

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO LIMA RODRIGUES

**FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS PRISM ALOS COM ESTIMATIVA DOS
POI EM ÓRBITA UTILIZANDO OS MODELOS DE PLATAFORMA UCL E J2**

CURITIBA

2015

TIAGO LIMA RODRIGUES

**FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS PRISM ALOS COM ESTIMATIVA DOS
POI EM ÓRBITA UTILIZANDO OS MODELOS DE PLATAFORMA UCL E J2**

**Tese apresentada ao Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas, Setor de
Ciências da Terra, Universidade
Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do título de Doutor
em Ciências Geodésicas.**

**Orientadores: Prof. Dr. Edson
Aparecido Mitishita e Prof. Dr. Luiz
Danilo Damasceno Ferreira.**

CURITIBA

2015


TERMO DE APROVAÇÃO


TIAGO LIMA RODRIGUES


"FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS PRISM ALOS COM ESTIMATIVA DOS POI
EM ÓRBITA UTILIZANDO OS MODELOS DE PLATAFORMA UCL E J2"

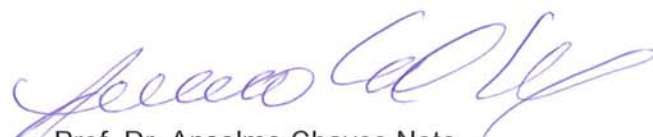
Tese nº 100 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

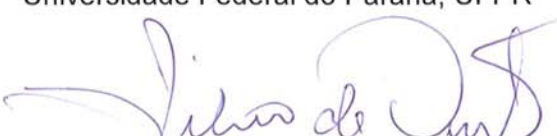
Orientador:


Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Universidade Federal do Paraná, UFPR


Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto
Universidade Federal do Paraná, UFPR


Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas
Universidade Federal do Paraná, UFPR

Curitiba, 16 de dezembro de 2015.

*Dedico esta tese aos meus pais José Maria
(in memoriam) e Teresinha, à minha esposa
Iza Carla e à minha filha Maria Clara*

AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em especial aos professores orientadores Dr. Edson Aparecido Mitishita e Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira pelas ricas orientações direcionadas ao escopo desta pesquisa, por toda paciência, apoio e conhecimentos transmitidos ao longo do curso;

aos professores, secretaria e aos colegas do CPGCG, em especial ao amigo Felipe Marques e sua esposa Diana Beck por todo o apoio e ajuda prestados em inúmeros momentos;

à empresa TOPOCART Topografia Engenharia e Aerolevantamentos por ceder as ortofotos e os Modelos Digitais de Terreno utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa;

ao Departamento de Cartografia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho por ceder as imagens ALOS utilizadas nesta pesquisa;

aos professores membros da banca examinadora pelas valiosas considerações, sugestões, correções e críticas;

à CAPES, pelo financiamento prestado à realização desta pesquisa;

agradecimentos especiais à minha família.

RESUMO

No contexto dos modelos rigorosos para orientação de imagens orbitais, para que o completo potencial geométrico das mesmas seja explorado, duas questões surgem. A primeira está relacionada aos conhecimentos mais exatos possíveis dos parâmetros de orientação exterior (POE) e dos parâmetros de orientação interior (POI). Os valores dos POI são normalmente estimados por calibração em laboratório, antes do lançamento do satélite. Porém, as acelerações e mudanças ambientais drásticas impostas durante o lançamento do satélite, bem como a influência térmica do sol quando o mesmo encontra-se em órbita podem causar alterações nos valores nominais dos POI. Desta forma, a estimativa dos POI em órbita ao mesmo tempo em que ocorre a orientação das imagens é recomendável. A segunda questão diz respeito ao modelo de plataforma a ser utilizado na modelagem rigorosa, uma vez que as posições do satélite durante o imageamento devem ser estimadas com o máximo de exatidão. Nesta pesquisa propõe-se o uso do modelo de plataforma UCL e deste modelo adicionado da perturbação orbital proveniente da atração gravitacional da Terra, devido ao seu achatamento polar, denominado de modelo J2. Ambos os modelos foram adaptados ao uso de coordenadas referenciadas a um Sistema de Referência Terrestre. Foram avaliadas fototriangulações das imagens de três tripletos PRISM-ALOS, com e sem estimativa dos POI em órbita, utilizando os dois modelos de plataforma mencionados. A partir dos resultados verificou-se que o uso do modelo de plataforma J2 não proporcionou diferenças significativas nas exatidões, em relação ao uso do modelo UCL. Verificou-se também que a estimativa dos POI em órbita nas fototriangulações proporcionou melhorias significativas de exatidão nas componentes altimétricas. Nas exatidões planimétricas resultantes, a estimativa dos POI em órbita propiciou melhoras na ordem do decímetro. Com o objetivo de analisar a usabilidade dos POI estimados na orientação de outras imagens não participantes do processo de estimativa, os POI estimados com o primeiro tripleto foram utilizados para a orientação interior nas fototriangulações das imagens do terceiro tripleto. Como resultado verificou-se uma piora na componente planimétrica e uma ligeira melhora na componente altimétrica em relação à fototriangulação do terceiro tripleto com a estimativa dos POI em órbita.

Palavras chave: Estimativa dos POI; sensor PRISM; Modelo UCL; perturbação orbital devido à atração gravitacional terrestre.

ABSTRACT

In the context of rigorous models for satellite images orientation, two questions arise for the full exploration of the geometric potential. The first question relates to the most accurate possible knowledge of the exterior orientation parameters (EOP) and the interior orientation parameters (IOP). The IOP values are usually estimated by calibration in the laboratory, before the launch of the satellite. However, accelerations and drastic environmental changes imposed during the launch of the satellite, as well as the thermal influence of the sun when it is in orbit can cause changes in nominal IOP values. Thus, the images orientation with the on orbit estimate of IOP is recommended. The second question concerns the platform model to be used in rigorous modeling, since the satellite positions during the imaging should be estimated with maximum accuracy. This research proposes the use of the UCL platform model and of the UCL platform model added of the orbital perturbation from the Earth's gravitational attraction, due to its polar flattening. This platform model was called J2 model. Both models have been adapted to using coordinates referenced to the Terrestrial Reference System. Bundle block adjustments of three PRISM-ALOS images triplets with and without on orbit IOP estimation using the two mentioned platform models were evaluated. From the results it was found that the use of J2 platform model provided no significant differences in accuracies in relation to the use of UCL model. It was also found that the on orbit estimate of IOP in the bundle block adjustments provided significant improvements of accuracy for the altimetric components. In the planimetrics resulting accuracies, on orbit estimate of IOP provided improvement in the order of decimeter. In order to analyze the usability of the estimated IOP on the orientation of other images are not participants in the estimation process, the estimated IOP with the first triplet were used to the interior orientation in the bundle adjustment of the third triplet images. As a result it was observed a decrease of accuracy in planimetric component and a slight improvement in altimetric component relative to the bundle adjustment of the third triplet images with on orbit IOP estimation.

Key words: Estimate of IOP; PRISM sensor; UCL model; orbital perturbation due to the Earth's gravitational attraction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	EXEMPLO DE SENSOR DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE CONSTITUIÇÃO EM LINHA.....	28
FIGURA 2 -	EXEMPLO DE SENSOR DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE MATRIZ ESCALONADA.....	29
FIGURA 3 -	FORMAÇÃO DE UMA CENA ATRAVÉS DE UM SENSOR DE VARREDURA LINEAR.....	29
FIGURA 4 -	SISTEMA DE REFERÊNCIA DA IMAGEM.....	30
FIGURA 5 -	SISTEMAS DE REFERÊNCIA DA MATRIZ DE CCD.....	31
FIGURA 6 -	SISTEMA DE REFERÊNCIA DA CÂMERA E DA MATRIZ DE CCD.....	32
FIGURA 7 -	ESTRUTURA DO SATÉLITE ALOS.....	36
FIGURA 8 -	SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM.....	36
FIGURA 9 -	MODOS DE OBSERVAÇÃO DOS SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM...	37
FIGURA 10 -	ESTRUTURA DOS ARRANJOS CCD LINEARES DO SISTEMA ÓPTICO RÉ, NADIR E VANTE DO SENSOR PRISM.....	39
FIGURA 11 -	ESTRUTURA DO ARRANJO CCD LINEAR DO SISTEMA ÓPTICO NADIR DO SENSOR PRISM.....	40
FIGURA 12 -	ESTRUTURA DO ARRANJO CCD LINEAR DOS SISTEMAS ÓPTICOS RÉ E VANTE DO SENSOR PRISM.....	40
FIGURA 13 -	EFEITO DA ALTERAÇÃO DE TAMNHO DA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL.....	52
FIGURA 14 -	EFEITO DA ROTAÇÃO DE UMA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL.....	52
FIGURA 15 -	EFEITO DA FLEXÃO HORIZONTAL DE UMA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL.....	54
FIGURA 16 -	PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR (POE).....	55
FIGURA 17 -	PRINCÍPIO DA COLINEARIDADE APLICADA A SENSORES DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE CONSTITUIÇÃO EM LINHA.....	57
FIGURA 18 -	EFEITO DE PEQUENAS MUDANÇAS NOS PARÂMETROS PARA CÂMARAS <i>FRAME</i> E SENSORES DE VARREDURA LINEAR.....	64
FIGURA 19 -	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (a) E LIMITE DAS ÁREAS IMAGEADAS PELOS TRIPLETOS (b).....	74
FIGURA 20 -	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO TRIPLETO 1.....	75
FIGURA 21 -	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E VERIFICAÇÃO NOS TRIPLETOS 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	76
FIGURA 22 -	EXEMPLOS DE COORDENADAS DE PONTOS CENTROIDES.....	78
FIGURA 23 -	IMAGENS DERIVADAS DAS MATRIZES DE CCD DA CÂMERA RÉ DO TRIPLETO 1, COM OS <i>DUMMIES</i>	79
FIGURA 24 -	TRECHO DE UM ARQUIVO SUP COM DADOS DE POSIÇÃO EM QUILOMETROS E VELOCIDADE EM QUILOMETROS POR SEGUNDO DO SATÉLITE ALOS PARA DUAS ÉPOCAS.....	80
FIGURA 25 -	PROCESSO DE ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS POI E DAS ANÁLISES DE CORRELAÇÕES.....	94
FIGURA 26 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 1.....	97
FIGURA 27 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 1.....	98
FIGURA 28 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 2.....	107
FIGURA 29 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 2.....	107
FIGURA 30 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 1 E 2.....	110
FIGURA 31 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 3.....	115

FIGURA 32 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 3.....	116
FIGURA 33 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 4.....	124
FIGURA 34 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 4.....	125
FIGURA 35 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 3 E 4.....	127
FIGURA 36 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5.....	133
FIGURA 37 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5.....	133
FIGURA 38 -	DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5A (a) E PARA O EXPERIMENTO 5B (b).....	138
FIGURA 39 -	DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5A (a) E PARA O EXPERIMENTO 5B (b).....	139
FIGURA 40 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 5, 5A E 5B.....	142
FIGURA 41 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 10A, 10B E 10.....	152
FIGURA 42 -	MELHORAS E PIORAS NAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES PROPOSTAS PELAS FOTOTRIANGULAÇÕES COM ESTIMATIVA DOS POI.....	154

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	MODOS DE OBSERVAÇÃO DOS SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM.....	37
TABELA 2 -	POSIÇÃO DAS MATRIZES DE CCD, TAMANHO DOS PIXELS NAS MESMAS, DISTÂNCIAS FOCAIS, COORDENADAS DO PONTO PRINCIPAL DAS CÂMERAS DO SENSOR PRISM E TEMPO DE INTEGRAÇÃO DE IMAGEAMENTO DA (S) MATRIZ (ES) DE CCD FORNECIDOS PELA JAXA EM 2007.....	41
TABELA 3 -	EXEMPLO DE VETORES DE ESTADO INICIAIS DAS IMAGENS DO TRIPLETO 1.....	81
TABELA 4 -	DESVIOS-PADRÃO DOS POE INJUNCIONADOS NAS FOTOTRIANGULAÇÕES DOS TRIPLETOS.....	86
TABELA 5 -	PARÂMETROS A SEREM ESTIMADOS NOS AJUSTAMENTOS DOS EXPERIMENTOS.....	89
TABELA 6 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 1.....	96
TABELA 7 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 1.....	96
TABELA 8 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 1.....	97
TABELA 9 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 1.....	99
TABELA 10 -	ESTATÍSTICAS tAMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 1.....	100
TABELA 11 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 1.....	100
TABELA 12 -	POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTECOM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 2.....	101
TABELA 13 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI NO EXPERIMENTO 2.....	102
TABELA 14 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI NO EXPERIMENTO 2.....	103
TABELA 15 -	POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTECOM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 2 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.....	104
TABELA 16 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 2.....	105
TABELA 17 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 2.....	106
TABELA 18 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 2.....	106
TABELA 19 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 2.....	108
TABELA 20 -	ESTATÍSTICAS tAMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 2.....	108
TABELA 21 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 2.....	109
TABELA 22 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 2.....	111
TABELA 23 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 2.....	111
TABELA 24 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO	

	EXPERIMENTO 2.....	111
TABELA 25 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE POI E OS POE NO EXPERIMENTO 2.....	112
TABELA 26 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NOEXPERIMENTO 3.....	114
TABELA 27 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 3.....	114
TABELA 28 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 3.....	115
TABELA 29 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NOEXPERIMENTO 3.....	117
TABELA 30 -	ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO3.....	117
TABELA 31 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 3.....	118
TABELA 32 -	POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTECOM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 4.....	119
TABELA 33 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 4.....	120
TABELA 34 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 4.....	120
TABELA 35 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO EXPERIMENTO 4.....	121
TABELA 36 -	POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTECOM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 4 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.....	122
TABELA 37 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 4.....	123
TABELA 38 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 4.....	123
TABELA 39 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 4.....	124
TABELA 40 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 4.....	126
TABELA 41 -	ESTATÍSTICAS AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 4.....	126
TABELA 42 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 4.....	127
TABELA 43 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 4.....	128
TABELA 44 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 4.....	128
TABELA 45 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO EXPERIMENTO 4.....	128
TABELA 46 -	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE POI E OS POE NO EXPERIMENTO 4.....	129
TABELA 47 -	RESULTADOS DO AJUSTAMENTO NOEXPERIMENTO 5.....	131
TABELA 48 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 5.....	132
TABELA 49 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 5.....	132
TABELA 50 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 5.....	134
TABELA 51 -	ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO5.....	135
TABELA 52 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 5.....	135
TABELA 53 -	RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS NOEXPERIMENTOS 5A E 5B.....	136
TABELA 54 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E	

	PROCENTAGENS DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA OS EXPERIMENTOS 5A E 5B.....	137
TABELA 55 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 5 ^a	137
TABELA 56 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NOS TESTES DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTOS 5A E 5B.....	140
TABELA 57 -	ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.....	140
TABELA 58 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.....	141
TABELA 59 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 6.....	143
TABELA 60 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 6.....	144
TABELA 61 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 6.....	144
TABELA 62 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 6.....	145
TABELA 63 -	ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 6.....	146
TABELA 64 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 6.....	146
TABELA 65 -	POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 7 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.....	147
TABELA 66 -	RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 7.....	148
TABELA 67 -	VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PROCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 7.....	148
TABELA 68 -	VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 7.....	149
TABELA 69 -	VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 7.....	149
TABELA 70 -	ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 7.....	150
TABELA 71 -	EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 7.....	150
TABELA 72 -	POI EM COMUM ESTIMADOS COM O USO DOS TRIPLETOS 1 E 2 PARA TODAS AS TRÊS CÂMERAS E SEUS VALORES.....	157

LISTA DE SIGLAS

ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
ALOS	<i>Advanced Land Observation Satellite</i>
AVNIR-2	<i>Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CP	<i>Centro Perspectivo</i>
CPRS - ETH	<i>Chair of Photogrammetry and Remote Sensing - ETH/Zurique</i>
CRCSI	<i>Cooperative Research Centre for Spatial Information</i>
DSG	<i>Diretoria do Serviço Geográfico</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
GRS80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
IBGE	<i>Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference System Service</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRF97	<i>International Terrestrial Reference Frame 97</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
MDS	<i>Modelo Digital de Superfície</i>
MDT	<i>Modelo Digital de Terreno</i>
MUV	<i>Movimento Uniformemente Variado</i>
MVC	<i>Matriz Variância-Covariância</i>
PA	<i>Parâmetros Adicionais</i>
PALSAR	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
POI	<i>Parâmetros de Orientação Interior</i>
POE	<i>Parâmetros de Orientação Exterior</i>
PP	<i>Ponto Principal</i>
PRISM	<i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
REQM	<i>Raiz do Erro Quadrático Médio</i>
SGL	<i>Sistema Geodésico Local</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SOFA	<i>Standards of Fundamental Astronomy</i>
SRCG	<i>Sistema de Referência Celeste Geocêntrico</i>
SRC	<i>Sistema de Referência da Câmera</i>
SRI	<i>Sistema de Referência da Imagem</i>
SRM	<i>Sistema de Referência da Matriz de CCD</i>
SRO	<i>Sistema de Referência Orbital</i>
SRP	<i>Sistema de Referência da Plataforma</i>
SRT	<i>Sistema de Referência Terrestre</i>
SRTC	<i>Sistema de Referência Terrestre Convencional</i>
TDB	<i>Tempo Dinâmico Baricêntrico</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

L, C	Coordenadas linha e coluna do Sistema de Referência da Imagem
x_s, y_s	Coordenadas do Sistema de Referência da Matriz de CCD
x_c, y_c	Coordenadas do Sistema de Referência da Câmera
n_c	Número de colunas na matriz de CCD
PS	Tamanho do pixel na matriz de CCD
f	Distância focal
X, Y, Z	Terno cartesiano de um Sistema de Referência Terrestre
X_C, Y_C, Z_C	Terno cartesiano de um Sistema de Referência Celeste Geocêntrico
x_0, y_0	Coordenadas do Ponto Principal
t_{CCD}	Tempo de integração de imageamento das matrizes de CCD
GM	Constante Gravitacional Geocêntrica
\vec{r}	Vetor aceleração em um Sistema de Referência Celeste Geocêntrico
\vec{r}	Vetor posição em um Sistema de Referência Celeste Geocêntrico
a_e	Semi-eixo maior de um Elipsoide de Referência
J_2	Coefficiente dos harmônicos esféricos do geopotencial zonal de grau 2
ω_t	Módulo da velocidade angular de rotação da Terra
K_1, K_2, K_3	Coefficientes de distorção radial simétrica
P_1, P_2	Coefficientes de distorção descentrada
Δf	Variação sistemática da distância focal
s_x, s_y	Coefficientes de variação de escala do sistema óptico sobre as coordenadas do Sistema de Referência da Câmera
p_x, p_y	Fatores de escala de mudança da dimensão do pixel no Sistema de Referência da Matriz de CCD
dx, dy	Componentes das translações do centro de uma dada matriz de CCD para o Ponto Principal no plano focal da câmera
θ	Rotação da matriz de CCD em relação ao eixo x_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
δ	Ângulo central do efeito da flexão de uma matriz de CCD
b_x, b_y, b_z	Ângulos de <i>boresight</i>
X_0, Y_0, Z_0	Componentes da posição do satélite em um Sistema de Referência Terrestre no instante de início do imageamento
V_{X0}, V_{Y0}, V_{Z0}	Componentes da velocidade do satélite em um Sistema de Referência Terrestre no instante de início do imageamento
ψ, P, R	Ângulos de atitude do satélite
ω, ϕ, κ	Ângulos de orientação do satélite
u_x, u_y, u_z	Componentes da velocidade do satélite em um Sistema de Referência Terrestre no instante de início do imageamento nos modelos de plataforma UCL e J2
X_T, Y_T, Z_T	Incertezas dos valores das componentes da posição do satélite em um Sistema de Referência Terrestre no instante de início do imageamento
u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}	Incertezas dos valores das componentes da velocidade do satélite em um Sistema de Referência Terrestre no instante de início do imageamento
d_1, d_2	Coefficientes polinomiais da modelagem de mudança do ângulo κ_0 de orientação do satélite referente ao instante de início do imageamento
$a_{0_matriz1}, b_{0_matriz1}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 1 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz2}, b_{0_matriz2}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 2 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 3 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz4},$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das

$b_{0_matriz4}$	translações do centro da matriz de CCD 4 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz5},$ $b_{0_matriz5}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 5 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz6},$ $b_{0_matriz6}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 6 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz7},$ $b_{0_matriz7}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 7 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{0_matriz8},$ $b_{0_matriz8}$	Parâmetros corretivos das alterações sistemáticas das componentes das translações do centro da matriz de CCD 8 para o Ponto Principal no plano focal da câmera
$a_{1_matriz1},$ $b_{1_matriz1}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz2},$ $b_{1_matriz2}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz3},$ $b_{1_matriz3}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz4},$ $b_{1_matriz4}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz5},$ $b_{1_matriz5}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz6},$ $b_{1_matriz6}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz7},$ $b_{1_matriz7}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$a_{1_matriz8},$ $b_{1_matriz8}$	Parâmetros corretivos dos efeitos de rotação da matriz de CCD 1e mudanças das dimensões dos pixels na direção do eixo y_s do Sistema de Referência da Matriz de CCD
$\delta_matriz1$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD1
$\delta_matriz2$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD2
$\delta_matriz3$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD3
$\delta_matriz4$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD4
$\delta_matriz5$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD5
$\delta_matriz6$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD6
$\delta_matriz7$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD7
$\delta_matriz8$	Ângulo central do efeito da flexão da matriz de CCD8
σ_0^2	Fator de variância da unidade de peso a priori
$\hat{\sigma}_0^2$	Fator de variância da unidade de peso a posteriori
V	Vetor dos resíduos das observações
V'	Vetor dos resíduos dos parâmetros injuncionados
P	Matriz peso das observações
P'	Matriz peso dos parâmetros injuncionados
X_L, Y_L, Z_L	Terno cartesiano do Sistema Geodésico Local
W	Estatística W utilizada no teste de hipótese de Shapiro-Wilk
t	Estatística t de <i>student</i>
χ^2	Estatística Qui-quadrado
μ	Média amostral do conjunto de discrepâncias nos pontos de verificação

σ	Desvio-padrão amostral do conjunto de discrepâncias nos pontos de verificação
h	Altitude elipsoidal nominal da órbita do satélite ALOS
B	Base fotogramétrica entre as imagens ré a vante
d_{px}	Precisão de medida da paralaxe

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	24
1.2.1 Objetivo geral.....	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	25
1.3 JUSTIFICATIVA.....	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 SENSORES DE VARREDURA LINEAR.....	28
2.2 SISTEMAS DE REFERÊNCIA.....	30
2.2.1 Sistemas de referência do espaço imagem.....	30
2.2.2 Sistemas de referência do espaço objeto.....	33
2.3 MISSÃO ALOS E O SENSOR PRISM.....	34
2.3.1 Plano focal do sensor PRISM.....	38
2.4 ÓRBITA KEPLERIANA E PERTURBADA.....	43
2.4.1 Perturbação devido à atração gravitacional terrestre.....	44
2.5 MODELAGEM RIGOROSA PARA FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES DE VARREDURA LINEAR ORBITAIS.....	46
2.5.1 Orientação interior.....	47
2.5.1.1 Parâmetros de orientação interior relacionados ao sistema óptico.....	48
2.5.1.2 Parâmetros de orientação interior relacionados às matrizes de CCD.....	51
2.5.2 Orientação exterior.....	55
2.5.3 Modelagem matemática.....	56
2.5.3.1 Modelo órbita-atitude.....	58
2.5.3.2 Modelo posição-rotação.....	61
2.5.3.3 Modelo de plataforma UCL.....	64
2.6 CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA EM ÓRBITA DE SENSORES DE VARREDURA LINEAR ORBITAIS.....	67
2.6.1 Calibração em serviço do sensor PRISM – ALOS.....	70
3 METODOLOGIA	72
3.1 MATERIAIS.....	72
3.2 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO.....	73
3.3 ÁREA DE ESTUDO E AQUISIÇÃO DOS PONTOS.....	74
3.4 EXTRAÇÃO DOS VETORES DE ESTADO DO SATÉLITE ALOS.....	79
3.5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE PLATAFORMA.....	81
3.6 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO.....	83
3.7 ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E DAS CORRELAÇÕES.....	93
4. RESULTADOS	95
4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS UTILIZANDO O MODELO DE PLATAFORMA UCL.....	95
4.1.1 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL.....	95
4.1.2 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 com estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL.....	101
4.1.3 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL.....	113
4.1.4 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 com estimativa dos POI em	

órbita utilizando o modelo de plataforma UCL.....	118
4.1.5 Resultados da aplicação dos POI estimados com as imagens do tripleto 1 na fototriangulação das imagens do tripleto 3 utilizando o modelo de plataforma UCL.....	130
4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS UTILIZANDO O MODELO DE PLATAFORMA J2.....	143
4.2.1 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2.....	143
4.2.2 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 com estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2.....	147
4.2.3 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2.....	151
4.3. SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	153
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	158
6 REFERÊNCIAS.....	162

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos dias atuais, imagens obtidas a partir de sensores instalados em plataformas orbitais têm se tornado importantes fontes de aquisição de dados espaciais. Em um contexto mais específico, quando a finalidade de utilização é a produção e atualização de documentos cartográficos, dentro de um determinado limite de escala, algumas vantagens propostas pelo uso destas imagens em relação às fotografias aéreas convencionais podem ser evidenciadas. Dentre algumas, pode-se citar: baixo custo, imageamento de grandes áreas e alta frequência de aquisição de dados.

Neste âmbito, as imagens provenientes do sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) do satélite japonês ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*), lançado em 24 de janeiro de 2006 e fora de operação desde 12 de maio de 2011, devido a problemas ocorridos nos sistemas de geração de energia, tiveram o objetivo de contribuir para o mapeamento, observação da cobertura da terra, monitoramento de desastres e levantamento de recursos naturais (*Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA*, 2012). Um dos principais produtos passível de ser gerado com estas imagens é o MDS (Modelo Digital de Superfície), uma vez que este sensor é composto por três câmeras (ré, nadir e vante) que foram projetadas para gerar modelos estereoscópicos.

Particularmente para a Cartografia brasileira, as imagens do satélite ALOS foram utilizadas tanto em instituições públicas, federais, municipais e estaduais, bem como no setor privado. Parte deste resultado é atribuído ao acordo de cooperação entre o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e a ASF (*Alaska Satellite Facility*), que estabelecia o IBGE como responsável pela distribuição das imagens ALOS para órgãos dos governos federal, estadual e municipal, instituições de pesquisa e demais usuários não comerciais do Brasil, a preços acessíveis. O acordo chegou ao fim em meados do ano de 2011. Apesar das imagens ALOS não serem

mais geradas, uma grande quantidade de cenas do acervo ainda encontram-se em utilização, sendo comercializadas amplamente no Brasil e no mundo.

Um requisito necessário para que haja a possibilidade de extração de informações geodésicas e/ou cartográficas destas imagens é a orientação das mesmas com relação ao espaço objeto. Tal orientação é realizada a partir de uma modelagem matemática que possibilite a obtenção de coordenadas do espaço objeto (coordenadas terrestres), a partir de coordenadas do espaço imagem, ou vice-versa. Atualmente, os modelos matemáticos funcionais para orientação de imagens são definidos em duas classes de acordo com a complexidade, exatidão e aplicabilidade, a saber (TOUTIN, 2004): modelos rigorosos e modelos aproximados ou generalizados.

A modelagem rigorosa objetiva reproduzir o processo físico de formação da imagem, utilizando o princípio de colinearidade. Entretanto, esta modelagem recebe uma modificação em relação à efetuada em fotos aéreas convencionais, pois as imagens obtidas por sensores de varredura linear são formadas pela junção das várias linhas CCD (*Charge Couple Device*) do sensor, obtidas em diferentes momentos, ao longo da órbita do satélite. É importante ressaltar que os modelos rigorosos são indicados pela literatura como os que apresentam resultados mais exatos com menor quantidade de pontos de controle e apresentam também maior flexibilidade na distribuição de pontos de controle (JACOBSEN, 2007).

A orientação por modelagem rigorosa requer a realização da orientação exterior e interior. A orientação exterior refere-se à definição das posições e ângulos de atitude da plataforma durante a formação da imagem, sendo denominados de parâmetros de orientação exterior (POE). Já a orientação interior encarrega-se da definição de parâmetros responsáveis pela recuperação da geometria de imageamento, sendo tais parâmetros denominados parâmetros de orientação interior (POI). Como exemplos de POI tradicionais podem-se citar a distância focal, as coordenadas do ponto principal (PP) e os coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada do sistema de lentes da câmera.

Os POE podem ser estimados de forma direta ou indireta. A estimativa direta é feita quando existem dados de rastreamento de órbita para a determinação das posições do satélite, ou ainda quando se encontram embarcados receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para o mesmo propósito, e; sensores de estrela

para a determinação dos ângulos de atitude. Nestes casos, a orientação exterior pode ser realizada se os dados estiverem disponíveis aos usuários, sendo possível realizar o denominado georreferenciamento direto. Por outro lado, a estimativa indireta é utilizada quando não se dispõe dos dados de posição e atitude do satélite. Neste caso, os POE são estimados em um ajustamento de observações, a partir do uso da modelagem rigorosa e de feições de controle em campo, tais como pontos, retas ou polígonos com informações posicionais terrestres conhecidas.

É importante destacar que quando há necessidade de resultados mais acurados, deve-se levar em consideração que os dados procedentes da orientação direta apresentam incertezas, devendo ser refinados a partir também de um ajustamento de observações com injunções relativas de peso utilizando pontos de controle em campo (RADHADEVI *et al.*, 1998; POLI, 2005; JACOBSEN, 2005). Outra possibilidade é incluir parâmetros corretivos das componentes da posição e dos ângulos de atitude para serem estimados (KOCAMAN, 2007). No caso do satélite ALOS, os dados do receptor GPS (*Global Positioning System*) e do sensor de estrelas embarcados são disponibilizados aos usuários, permitindo que seja efetuada a orientação exterior de forma direta. Entretanto, conforme pode ser visto em Tadono *et al.*, (2007a), Weser *et al.*, (2008a), Schneider *et al.*, (2008) e Kocaman (2007), o refinamento dos POE a partir da inserção de pontos de controle em campo faz-se necessário por conta de suas incertezas.

Os parâmetros de orientação interior (POI) na maioria das vezes são estimados a partir de processos de calibração em laboratório, antes do satélite ser lançado, e são posteriormente fornecidos aos usuários pelas agências que distribuem as imagens. No entanto, após o lançamento, estando o satélite em órbita, há a possibilidade dos valores nominais dos POI se alterarem. Segundo Baltsavias *et al.* (2006) e ainda Jacobsen (2005), dois problemas que contribuem para a instabilidade dos valores de POI calibrados em laboratório, são as acelerações e mudanças ambientais drásticas impostas durante o lançamento do satélite, bem como a influência termal do sol quando o satélite encontra-se em órbita. Deste modo, deve-se realizar a chamada calibração geométrica em órbita (JACOBSEN, 2005) a qual permite a estimativa dos POI simultaneamente à orientação da (s) imagem (ns). Este procedimento pode ser requerido de tempos em tempos para a estimativa de parâmetros mais significativos com a realidade física

no instante da formação da imagem. Uma questão importante a se considerar é que nos casos de georreferenciamento direto, uma vez que os POE recebem injunções absolutas ou relativas, a diferença nos resultados de orientação quando não considera-se a instabilidade dos POI tornam-se mais significativas. Isto ocorre pelo fato de que as imprecisões de alguns POI não serão compensadas pelos POE calculados.

Uma importante característica na geometria do plano focal do sensor PRISM – ALOS é que o arranjo de constituição em linha CCD é composto de múltiplas matrizes, o que é comum em outros sensores satelitais como o pan do satélite IRS-1C, os sensores do satélite IKONOS e Quickbird e os sensores das missões CBERS. Outra característica comum com outros sensores é que o Ponto Principal (PP) não é coincidente com o centro geométrico do arranjo de matrizes (KOCAMAN, 2007). Por motivos de imprecisão de fabricação, pequenos deslocamentos bidirecionais e rotações entre as matrizes de CCD no plano focal acabam ocorrendo (POLI, 2005). Além disso, os tamanhos das matrizes podem ser ligeiramente diferentes, e o afastamento da linearidade das mesmas pode também ocorrer. Segundo Weser *et al.*, (2008b), para que o completo potencial geométrico das imagens PRISM seja explorado, todos os erros sistemáticos anteriormente citados devem ser considerados. Deste modo, no conjunto completo de POI, além dos tradicionais mencionados, acrescentam-se estes POI relacionados com a geometria do plano focal. Exemplos de calibração geométrica em órbita do sensor PRISM – ALOS podem ser vistos em Tadono *et al.*, (2004), Tadono *et al.*, (2010), Kocaman (2007) e Weser *et al.*, (2008a) utilizando diferentes áreas de teste e conjuntos de POI.

Ao realizar a orientação pela abordagem rigorosa, deve-se considerar na modelagem que cada linha da imagem apresentará um conjunto de POE diferentes. Desta forma, é necessária uma modelagem matemática adicional, denominada de modelo de plataforma, que descreva satisfatoriamente as mudanças dos POE durante o processo de geração da imagem. Ao longo dos anos, diversas pesquisas propuseram diferentes modelos de plataforma, associados ao princípio de Colinearidade. Os modelos de plataforma desenvolvidos foram baseados na utilização de polinômios (GUGAN; DOWMAN, 1988; WESTIN, 1990; ORUN E NATARAJAN, 1994; BANG; CHO, 2001; KIM; DOWMAN, 2006; MARCATO

JÚNIOR, 2011), de interpoladores como *spline* (KOCAMAN, 2007; KOCAMAN; GRUEN, 2007a; WESER *et al*, 2007; FRASER *et al*, 2007; WESER *et al*, 2008a e b; ROTTENSTEINER *et al*, 2009) ou de parâmetros de Mecânica Orbital (SALAMONOWICZ, 1986; KRATKY, 1989; RADHADEVI; RAMACHANDRAN, 1994; RADHADEVI *et al*, 1998; VALADAN, 1997; AL-ROUSAN *et al*, 1997; VALADAN; PETRIE, 1998; FRITSCH; STALLMAN, 2000; CHEN; TEO, 2002; VALADAN; SADEGHIAN, 2003; BAIOCCHI *et al*, 2004; GIANONNE, 2006).

Baseado no modelo de plataforma que utiliza polinômios de 2º grau, Michalis (2005) associou os termos lineares às componentes da velocidade do satélite e os termos quadráticos às componentes da aceleração. A partir desta consideração, foi desenvolvido o denominado modelo UCL, no qual as acelerações são estimadas a partir da Solução do Problema dos Dois Corpos, ou seja, considerando que o movimento do satélite na órbita é um movimento kepleriano, desprovido da consideração de perturbações orbitais sobre o mesmo. O modelo UCL (*University College of London*) foi desenvolvido para fototriangulação de imagens obtidas na mesma órbita (faixa), em sequência de tempo na mesma data (*along-track*). A principal questão é que o conjunto estimado de POE referente à primeira linha da primeira imagem da faixa pode ser propagado para as demais linhas, tanto da primeira imagem da faixa como para as demais. Neste ponto, a aplicação deste modelo, no caso de determinação dos POE de forma indireta, apresenta uma grande vantagem de diminuição de parâmetros a serem estimados no processo de ajustamento de observações (MICHALIS; DOWMAN, 2005; MICHALIS; DOWMAN, 2008a). Um exemplo de aplicação do modelo UCL na orientação de imagens PRISM com posterior geração de um MDS pode ser visto em Dowman *et al.*, (2011).

Uma questão importante, no entanto, é que a consideração de uma órbita kepleriana pode prejudicar ou não os resultados finais da orientação. Isto tendo em vista que, mesmo em um curto arco de órbita percorrido pelo satélite durante o imageamento, as influências de diversas perturbações orbitais podem estar presentes. De todas, apresenta-se como mais significativa a atração devido ao potencial gravitacional da Terra levando-se em consideração o seu achatamento polar (SEEBER, 2003; GEMAEL; ANDRADE, 2004).

Mediante o apresentado nestas considerações iniciais, a presente pesquisa volta-se à investigação da exatidão de coordenadas planialtimétricas do espaço

objeto, extraídas da fototriangulação de imagens de tripletos PRISM com estimativa dos POI em órbita, utilizando a modelagem de colinearidade com pontos de controle em conjunto com dois modelos de plataforma diferentes e um conjunto diferente de POI em relação ao utilizado nas pesquisas de calibração geométrica mencionadas. O primeiro modelo de plataforma utilizado foi o modelo de plataforma UCL desenvolvido por Michalis (2005). O segundo foi o modelo de plataforma UCL adicionado da perturbação orbital da atração gravitacional terrestre devido ao seu achatamento polar, sendo denominado nesta pesquisa de modelo de plataforma J2. Uma vez que o modelo UCL foi desenvolvido para o uso de coordenadas referenciadas a um Sistema de Referência Celeste Geocêntrico (SRCG), nesta pesquisa foi realizada uma adaptação para o uso de coordenadas referenciadas a um Sistema de Referência Terrestre (SRT). Cabe ressaltar que mesmo este satélite estando fora de operação, as imagens obtidas permanecem em uso. Além disso, as metodologias investigadas podem ser aplicadas em outros sistemas com sensores de varredura linear orbitais com características semelhantes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Investigar a exatidão planialtimétrica de informações geodésicas extraídas da fototriangulação de imagens de tripletos PRISM, empregando a estimativa dos POI do sensor em órbita, utilizando o modelo rigoroso de colinearidade com pontos de controle, em conjunto com os modelos de plataforma UCL e J2.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Inserir na aceleração do modelo UCL o termo adicional referente à aceleração do potencial gravitacional da Terra, levando-se em consideração o seu achatamento polar;
- ✓ Adaptar os modelos UCL e J2 para uso de coordenadas referenciadas a um SRT;
- ✓ Utilizar a técnica dos centroides de superfícies para o refinamento das medidas dos pontos de controle e verificação;
- ✓ Realizar as fototriangulações de dois tripletos PRISM utilizando o modelo de colinearidade com pontos de controle em conjunto com os modelos de plataforma UCL e J2, com e sem estimativa dos POI em órbita;
- ✓ Analisar a significância dos POI, determinando um conjunto ótimo para ser utilizado nas fototriangulações;
- ✓ Investigar na prática a possibilidade de utilização dos POI estimados na fototriangulação de um dos tripletos na fototriangulação de um outro triplete.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país que apresenta um déficit de cartas topográficas nas escalas de 1:25000 e maiores. Uma alternativa de baixo custo, em relação ao levantamento aerofotogramétrico, para o mapeamento topográfico na escala citada é a utilização de imagens orbitais. Neste contexto as imagens PRISM do satélite ALOS se apresenta como uma excelente opção, por apresentar um GSD (*Ground Sample Distance*) de 2,5 m e principalmente pela capacidade de obtenção de

imagens convergentes, o que possibilita o fornecimento de coordenadas altimétricas e até geração de MDS. Cabe ressaltar que durante certo período uma parceria entre o IBGE e a ASF permitiram a comercialização destas imagens a preços reduzidos para usuários não comerciais, como instituições de ensino e pesquisa. Porém, para que o completo potencial geométrico das imagens PRISM seja explorado, ao utilizar-se a modelagem rigorosa, o processo matemático de obtenção das imagens deve ser o mais próximo possível da realidade física. Esta questão passa pela obtenção dos POI e dos POE com o máximo de exatidão.

Uma vez que os valores nominais dos POI podem se alterar durante o lançamento do satélite e também quando o mesmo se encontra em órbita, é importante que ocorra a estimativa dos POI da câmera em órbita, ao mesmo tempo em que se realiza a orientação da (s) imagem (ns). Tal procedimento visando o aumento da exatidão planialtimétrica da (s) orientação (ões) e de todos os produtos fotogramétricos subsequentes, como vetores restituídos, ortoimagens e MDS. Particularmente para o sensor PRISM, diversas pesquisas relacionadas à calibração geométrica em órbita foram realizadas pela JAXA, pela CPRS - ETH Zurich (*Chair of Photogrammetry and Remote Sensing - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*) e pelo CRCSI (*Cooperative Research Centre for Spatial Information*). Exemplos podem ser vistos em Tadono *et al.*, (2006), Kocaman (2007) e Weser *et al.*, (2008a).

Com relação aos POE, há a preocupação com a modelagem das mudanças de posição do centro perspectivo (CP) da câmera e orientação da mesma durante a formação da imagem. Dentro deste contexto, a utilização do modelo UCL, ao invés de modelos que utilizam polinômios no modelo de plataforma, visa possibilitar a utilização dos dados de posição e velocidade extraídos diretamente dos metadados. Outra causa de uso do modelo UCL é que no caso do satélite ALOS, o receptor GPS embarcado fornece dados de posição e velocidade em intervalos de tempo de um minuto. Por conta desta relativa baixa frequência de dados, o pré-ajustamento para se estimar os coeficientes polinomiais do modelo de plataforma polinomial torna-se inviável, uma vez que a curva não se ajusta com precisão. Desta forma, não há possibilidade de se dispor dos coeficientes polinomiais para serem inseridos nos ajustamentos com injunções relativas.

Porém, uma questão que pode ser considerada como uma desvantagem no uso do modelo UCL original é a necessidade de se utilizar coordenadas do espaço objeto referenciadas a um SRCG, o que inclui mais uma etapa no processamento, uma vez que as coordenadas dos pontos de controle e verificação normalmente são obtidas referenciadas a um SRT. Outra questão que pode ser apresentada como uma desvantagem é a consideração de uma órbita kepleriana, ou seja, isenta de perturbações orbitais. Como ideia para diminuir o efeito desta consideração, pode-se verificar a hipótese da inclusão das modelagens de acelerações adicionais na órbita do satélite. Segundo Seeber (2003), a perturbação orbital mais significativa, seja para satélites de órbitas baixas, médias ou altas, é o achatamento terrestre, fazendo com que haja uma atração gravitacional diferente da imposta pela Terra esférica, conforme a teoria do Problema dos Dois Corpos. Este efeito é modelado a partir do desenvolvimento do potencial gravitacional terrestre em uma função harmônica, levando em consideração apenas o coeficiente dos harmônicos esféricos de grau 2 (J_2).

Diante do exposto, esta pesquisa propõe como contribuição a investigação da exatidão planialtimétrica de informações geodésicas extraídas de tripletos PRISM, empregando a estimativa dos POI do sensor em órbita, utilizando um grupo diferente de POI em relação ao utilizado nos trabalhos desenvolvidos pelas agências citadas, e a utilização dos modelos de plataforma UCL e J_2 adaptados ao uso de coordenadas referenciadas a um SRT.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SENSORES DE VARREDURA LINEAR

Os sensores de varredura linear utilizam uma ou mais matrizes de detectores CCD (*charge-coupled device*), em linha reta, no plano focal da câmera para a aquisição das imagens. Uma vez que operam com o princípio *pushbroom*, estes sensores são localizados perpendicularmente à linha de deslocamento do satélite em órbita. Segundo Poli (2005), há diversos tipos de configurações dos arranjos das matrizes de CCD no plano focal, podendo ser classificados em: arranjos de constituição em linha e arranjos de matriz escalonada.

A constituição em linha consiste em um arranjo no qual uma ou mais matrizes de CCD formam uma linha da imagem. No caso de múltiplas matrizes, estas são colocadas uma ao lado da outra, ao longo de uma única linha, conectadas por uma pequena sobreposição (Figura 1). Sensores como o dos satélites IKONOS e QUICKBIRD, bem como o sensor PRISM do satélite ALOS são exemplos de sensores com múltiplas matrizes de arranjo de constituição em linha.

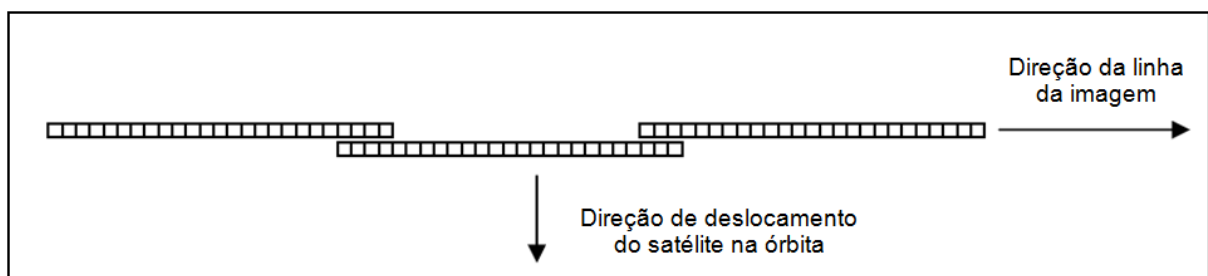


FIGURA 1 – EXEMPLO DE SENSOR DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE CONSTITUIÇÃO EM LINHA.

FONTE: ADAPTADO DE KOCAMAN (2007).

O arranjo de matriz escalonada consiste em um arranjo no qual duas matrizes de CCD únicas e idênticas são colocadas uma perto da outra com o objetivo de aumentar a resolução no terreno. Para fixar as posições das matrizes, uma é tomada como referência e a outra é deslocada por meio pixel na direção da

linha da imagem (Figura 2). Exemplos de sensores com este tipo de arranjo são: ADS40 da *Leica Geosystems* e os sensores das missões do programa SPOT.

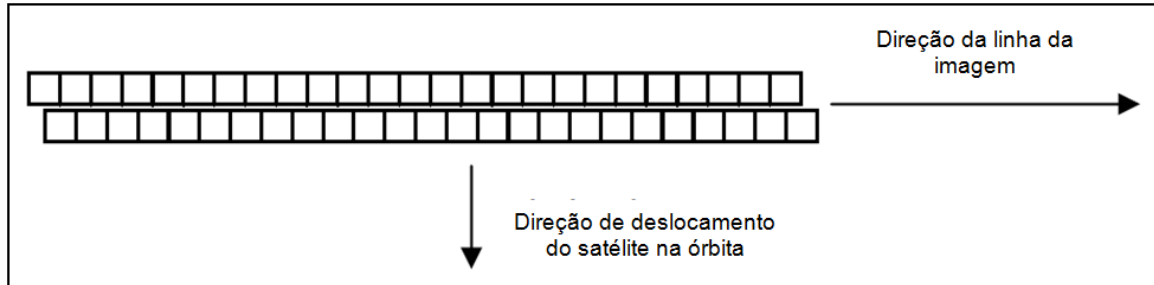


FIGURA 2 – EXEMPLO DE SENSOR DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE MATRIZ ESCALONADA.

FONTE: ADAPTADO DE KOCAMAN (2007).

Como consequência do princípio de funcionamento, as imagens bidimensionais provenientes deste tipo de sensor são formadas a partir da associação das imagens originalmente unidimensionais, adquiridas em intervalos regulares de tempo pelas matrizes de CCD. Quando este tipo de sensor é embarcado em um satélite, a aquisição das imagens unidimensionais é realizada à medida que o satélite se desloca ao longo de sua órbita. Desta forma, diferentes POE são definidos durante o processo de construção das imagens bidimensionais. A Figura 3 a seguir ilustra o processo de formação de uma imagem obtida a partir de um sensor de varredura linear com uma única matriz de CCD de arranjo de constituição em linha.

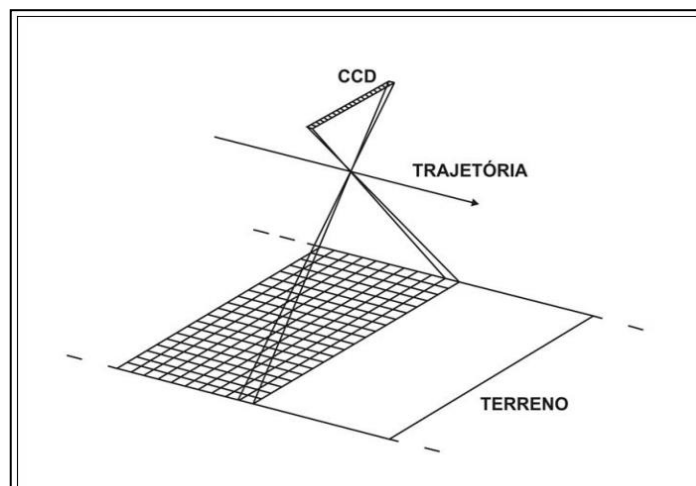


FIGURA 3 - FORMAÇÃO DE UMA CENA ATRAVÉS DE UM SENSOR DE VARREDURA LINEAR.

FONTE: ADAPTADA DE WOLF E DEWITT (2000).

2.2 SISTEMAS DE REFERÊNCIA

Uma vez que no processo de orientação das imagens diferentes sistemas de referência são utilizados, a seguir é realizada uma fundamentação teórica sobre os mesmos.

2.2.1 Sistemas de referência do espaço imagem

O primeiro sistema relacionado às imagens é o denominado Sistema de referência da imagem (SRI). Este é associado à matriz bidimensional dos pixels da imagem em um sistema de coordenadas de coluna (C) e linha (L). A origem do sistema encontra-se no centro do primeiro pixel da imagem (pixel do canto superior esquerdo). A direção do eixo L é coincidente com a direção das colunas da imagem, enquanto que a direção do eixo C coincide com a direção das linhas. A Figura 4 a seguir apresenta a origem e a direção dos eixos no SRI. Este é o sistema no qual é inicialmente efetuada a medida dos pontos de controle, fotogramétricos e de verificação no espaço imagem.

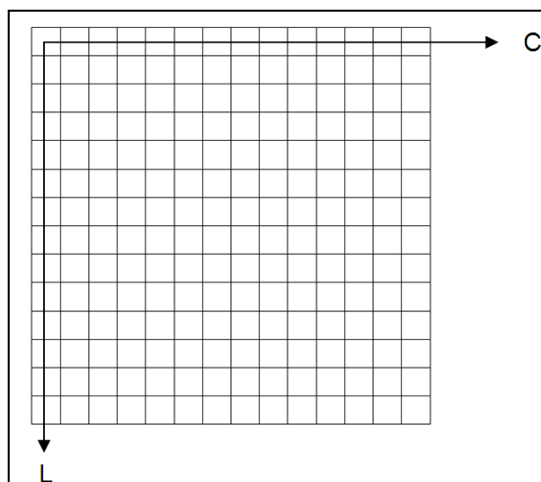


FIGURA 4 - SISTEMA DE REFERÊNCIA DA IMAGEM.

FONTE: RODRIGUES (2011).

O sistema utilizado posteriormente ao SRI é o Sistema de referência da matriz de CCD (SRM), sendo bidimensional e com origem no centro geométrico da matriz de CCD. O eixo x_s é coincidente com a direção perpendicular à linha da imagem (eixo L) e a direção do eixo y_s é paralela a esta (Figura 5).

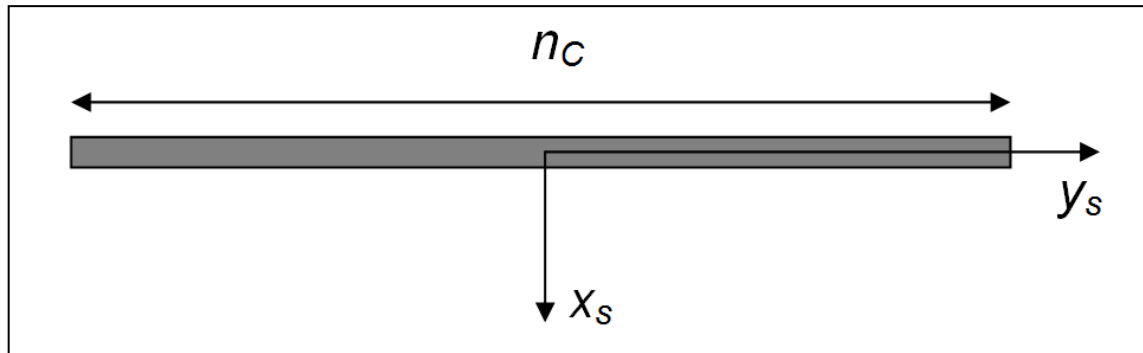


FIGURA 5 - SISTEMAS DE REFERÊNCIA DA MATRIZ DE CCD.

FONTE: ADAPTADO DE POLI (2005).

As Equações (1) e (2) a seguir apresentam a transformação de coordenadas do SRI para coordenadas do SRM, para o caso do sensor de varredura linear com arranjo de constituição em linha, assumindo a situação ideal onde não existam distorções provenientes do sistema de lentes e das imperfeições das matrizes de CCD no plano focal.

$$x_s = [L - \text{int}(L) - 0,5] \cdot PS, \quad (1)$$

$$y_s = PS \cdot C - \frac{(n_C - 1)}{2} \cdot PS = \left(C - \frac{(n_C - 1)}{2}\right) \cdot PS, \quad (2)$$

onde PS é o tamanho do pixel na matriz de CCD em mm e n_C é o número de colunas da imagem referente à matriz de CCD em questão.

Dispondo-se das medidas no SRM, utiliza-se posteriormente o Sistema de referência da câmera (SRC) para efetuar a orientação das imagens. Este é um sistema de coordenadas tridimensional, com as direções do eixo x_c e y_c paralelas às direções dos eixos x_s e y_s do SRM, respectivamente. A direção do eixo z_c é definida de forma a se ter um sistema dextrógiro (POLI, 2005). A origem deste sistema é localizada no CP da câmera, com este sendo definido a partir do ponto nodal posterior da objetiva da mesma. A projeção do CP no plano focal é denominada de

ponto principal (PP) e a distância focal f é a distância entre o CP e o PP. A Figura 6 ilustra o SRC e o SRM para um plano focal com 3 matrizes de CCD alocadas.

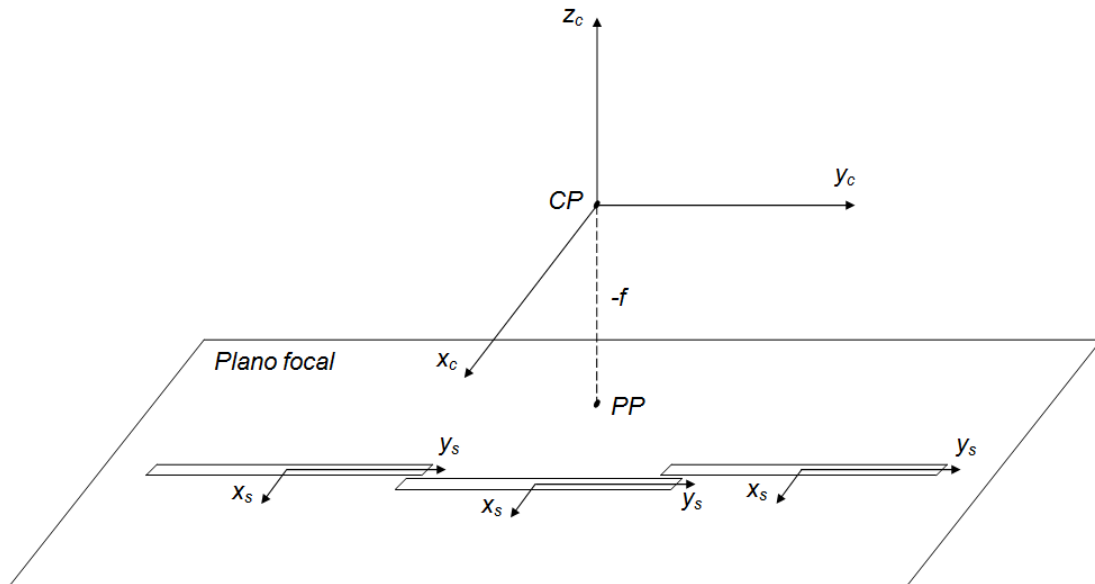


FIGURA 6 - SISTEMA DE REFERÊNCIA DA CÂMERA E DA MATRIZ DE CCD.

FONTE: O AUTOR (2012).

Considerando um caso ideal de uma matriz de CCD isenta de distorções, a transformação entre o SRM e o SRC é apresentada na Equação 3. Uma vez que em geral, para sensores de varredura linear orbitais, o PP não coincide com a posição central da (s) matriz (es) de CCD (Figura 6), uma translação tridimensional é necessária para compatibilizar a origem dos dois sistemas.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ -f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

onde dx e dy são as translações do centro de uma dada matriz de CCD para o PP no plano focal.

2.2.2 Sistemas de referência do espaço objeto

Com relação aos sistemas de referência do espaço objeto, dois tipos podem ser definidos a priori, a saber: os Sistemas de Referência Terrestre (SRT) e os Sistemas de Referência Celeste (SRC). Para fins operacionais, ocorre a adoção de referenciais por convenção, internacionalmente aceitos.

No caso do SRT, tem-se o Sistema de Referência Terrestre Convencional (SRTC), atualmente monitorado pelo *International Earth Rotation and Reference System Service* (IERS), sendo denominado de ITRS (*IERS Terrestrial Reference System*). De acordo com a resolução nº 2 da IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*), adotada em Viena em 1991, este sistema deve ser geocêntrico, com o centro de massa definido usando-se a Terra toda, inclusive oceanos e atmosfera. As direções dos eixos são orientadas da seguinte forma:

- Eixo *Z*: direção para o Polo de Referência *IERS* (*IRP*), definido pelo *BIH* (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações *BIH*, com sentido positivo para o Polo norte;
- Eixo *X*: na interseção do meridiano de referência *IERS* *IRM* (*International Reference Meridian*) com o plano que passa pela origem e normal ao eixo *Z*. O *IRM* coincide com o meridiano zero definido pelo *BIH* (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações *BIH*;
- Eixo *Y*: torna o sistema dextrógiro.

A realização do ITRS é denominada ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), a qual é atualizada de tempos em tempos, sendo a última realização a ITRF 2014. De uma forma geral, cada país ou continente apresenta uma solução específica para a definição do seu SRT, apresentando a máxima concordância possível com a definição do ITRS. No Brasil, assim como em todos os países dos continentes americanos, tem-se o SRT SIRGAS 2000 o qual foi realizado a partir de uma densificação do ITRF 2000 na época 2000,4.

Com relação ao SRC, a resolução A4 da Assembléia Geral da IAU (*International Astronomical Union*) em 1991, introduziu o Sistema de Referência

Celeste Geocêntrico (SRCG). Neste sistema, a origem é geocêntrica, o plano principal (equador) e o ponto vernal são definidos o mais próximo possível do equador médio e do equinócio dinâmico da época J2000 (MCCARTHY e PEPIT, 2004). Desta forma, as direções dos eixos são orientadas da seguinte forma:

- Eixo X_C : aponta muito próximo ao equinócio dinâmico às 12h TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico) em 1º de janeiro de 2000, ou seja, no dia Juliano 2451545,0 (J2000);
- Eixo Z_C : aponta para a direção do pólo de referência convencional, na mesma época, e;
- Eixo Y_C : completa o sistema de forma que seja dextrógiro.

A realização do SRCG é denominada ICRF (*International Celestial Reference Frame*), a qual também é atualizada de tempos em tempos, sendo a última realização a ICRF 2.

Atualmente, a transformação entre o ITRS e o SRCG deve ser realizada de acordo com as recomendações da IAU2000 (*International Astronomical Union 2000* – União Astronômica Internacional 2000) que passaram a vigorar a partir de 1º de janeiro de 2003. Para a realização dessa tarefa, são disponibilizadas sub-rotinas, em linguagem de programação Fortran e C, que compõe o SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*). Mais detalhes podem ser vistos em Seeber (2003) e Monico (2008).

2.3 MISSÃO ALOS E O SENSOR PRISM

O satélite ALOS foi lançado pela JAXA, a bordo do foguete H-IIA, em 24 de janeiro de 2006, do centro espacial de Tanegashima (Japão). A fase operacional e o fornecimento de dados ao público iniciaram-se a partir do dia 24 de outubro de 2006 e encerraram-se no dia 12 de maio de 2011. Sua tecnologia deriva da tecnologia desenvolvida por seus antecessores, os satélites japoneses ADEOS e JERS-1. Seu peso era de aproximadamente quatro toneladas e sua vida útil programada de três a

cinco anos. A órbita era circular heliossíncrona com altitude nominal de 691,65 km (do equador) e inclinação nominal de 98,16°.

A missão foi desenvolvida prioritariamente para promover pesquisas científicas e aplicadas na área de Sensoriamento Remoto, bem como prover o Japão e países da Ásia do Pacífico com dados cartográficos. O objetivo era oferecer subsídios ao estudo de temas ligados ao desenvolvimento sustentável, monitoramento de desastres naturais e recursos naturais. Segundo JAXA (2012), a missão ALOS foi planejada para:

- Gerar dados topográficos para integrar infra-estruturas de dados espaciais em escala global;
- Apoiar o desenvolvimento "sustentável" em nível local, para escala regional, através do monitoramento global dos recursos ambientais;
- Monitorar grandes catástrofes em escala global;
- Exploração de recursos não-renováveis; e
- Desenvolvimento tecnológico para futura observação da Terra.

A bordo do ALOS, foram embarcados três sensores: o radiômetro PRISM, que fornecia imagens pancromáticas com capacidade de adquirir modelos estereoscópicos; o radiômetro multiespectral AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2*), voltado aos mapeamentos de uso e cobertura das terras, com resolução espacial de 10 m e quatro bandas espectrais equivalentes ao Azul, Verde, Vermelho e Infravermelho Próximo; e o sensor de microondas PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) capaz de obter imagens diurnas e noturnas sem a interferência de nebulosidade, operando na banda L, com resolução espacial variando de 10 a 100 m. A Figura 7 apresenta o satélite e alguns de seus componentes, incluindo os três sensores.

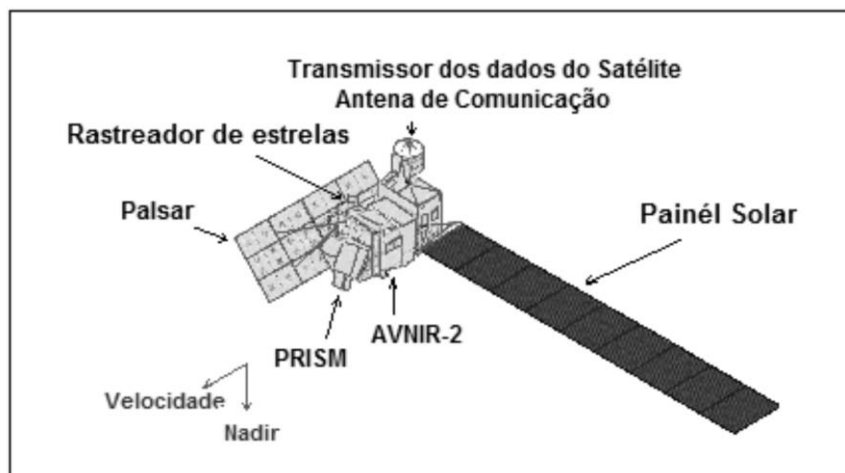


FIGURA 7 - ESTRUTURA DO SATÉLITE ALOS.

FONTE: ADAPTADO DE JAXA (2012).

O sensor PRISM fornecia imagens com GSD de 2,5 m no nadir, com resolução radiométrica de 8 bits, sendo a faixa espectral de 0,52 a 0,77 μm . Este sensor era composto por três sistemas ópticos independentes, permitindo o imageamento simultâneo nas direções vante (*forward*), nadir e ré (*backward*), permitindo visão estereoscópica e produção de MDS. As cenas podem ter visualização estereoscópica entre as direções vante e nadir, vante e ré, e nadir e ré, com inclinação das visadas vante e ré em relação ao nadir de $\pm 23,8^\circ$ respectivamente, com o objetivo de apresentar razão base/altura igual a 1,0 (JAXA, 2012). O intervalo de tempo de aquisição entre as imagens vante e nadir, bem como nadir e ré é de 45 segundos cada (KOCAMAN; GRUEN, 2007a). A Figura 8 ilustra o sensor PRISM com os três sistemas ópticos.

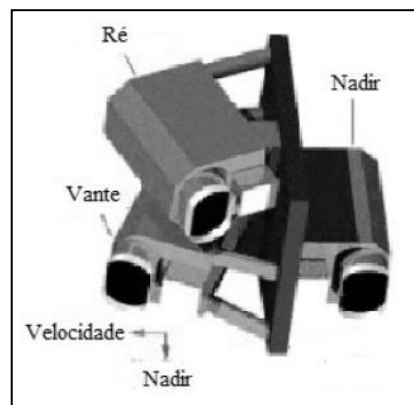


FIGURA 8 – SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM.

FONTE: ADAPTADO DE JAXA (2012).

O sistema óptico nadir cobre uma faixa de 70 km na superfície da Terra, enquanto os sistemas vante e ré cobrem 35 km cada. Tendo em vista a possibilidade de combinações, os modos de observação dos três sistemas ópticos do sensor PRISM são listados na Tabela 1 a seguir. A Figura 9 ilustra os modos de observação.

TABELA 1 – MODOS DE OBSERVAÇÃO DOS SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM.

Modo 1	Visadas vante, nadir e ré com largura da faixa de 35 km – tripleto.
Modo 2	Nadir (70km) + ré (35km)
Modo 3	Nadir (70km)
Modo 4	Nadir (35km) + vante (35km)
Modo 5	Nadir (35km) + ré (35km)
Modo 6	Vante (35km) + ré (35km)
Modo 7	Nadir (35km)
Modo 8	Vante (35km)
Modo 9	Ré (35km)

FONTE: ADAPTADO DE JAXA (2012).

Nota-se a partir da Tabela 1 que o modo de observação dos três sistemas ópticos simultaneamente, com faixa de 35 km, é denominado de modo tripleto.

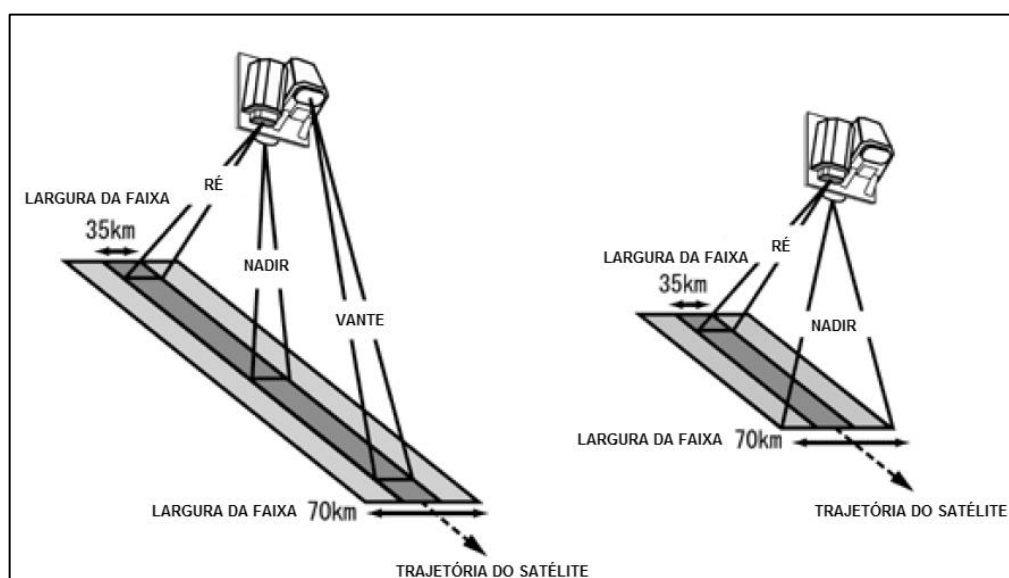


FIGURA 9 – MODOS DE OBSERVAÇÃO DOS SISTEMAS ÓPTICOS DO SENSOR PRISM.

FONTE: ADAPTADO DE JAXA (2012).

Devido ao amplo campo de visada dos sistemas ópticos, o modo triplete pode ser obtido sem a necessidade de artifícios mecânicos (escaneamento mecânico) e de mudanças de direção no ângulo de guinada (*yaw*) do satélite (JAXA, 2012). Sem esta característica as sobreposições das imagens no modo triplete não seriam possíveis, devido à rotação da Terra.

As imagens do sensor PRISM-ALOS são disponibilizadas aos usuários a partir de quatro níveis de processamento (JAXA, 2012):

- Nível 1A - Dado de sinal não comprimido e reconstruído, com coeficientes de calibração radiométrica e geométricos anexados, mas não aplicados.
- Nível 1B1 - Imagem com pixels alinhados em relação à trajetória do satélite; Calibração radiométrica aplicada.
- Nível 1B2-R - Imagem com pixels alinhados em relação à trajetória do satélite; Calibração radiométrica e coeficientes de correção geométrica aplicados. Coordenadas em projeção UTM. Imagem não orientada para o Norte.
- Nível 1B2-G - Imagem com pixels alinhados com a grade da projeção UTM; Calibração radiométrica e coeficientes de correção geométrica aplicados. Coordenadas em projeção UTM. Imagem não ortorretificada.

Para utilização de modelos rigorosos devem ser utilizados os níveis 1A ou 1B1, uma vez que a imagem deve estar sem reamostragem e sem projeção cartográfica que altere as condições geométricas originais de imageamento, a serem modeladas.

2.3.1 Plano focal do sensor PRISM

O plano focal do sensor PRISM, como citado anteriormente, é composto por várias matrizes de CCD com arranjo de constituição de linha. No sistema óptico nadir, a estrutura era composta por 6 matrizes de CCD, cada uma com 4992 detectores. Por outro lado, nos sistemas ré e vante a estrutura era composta por 8

matrizes de CCD, com 4928 colunas cada. As matrizes eram sobrepostas com uma interseção de 32 colunas (Figura 10).

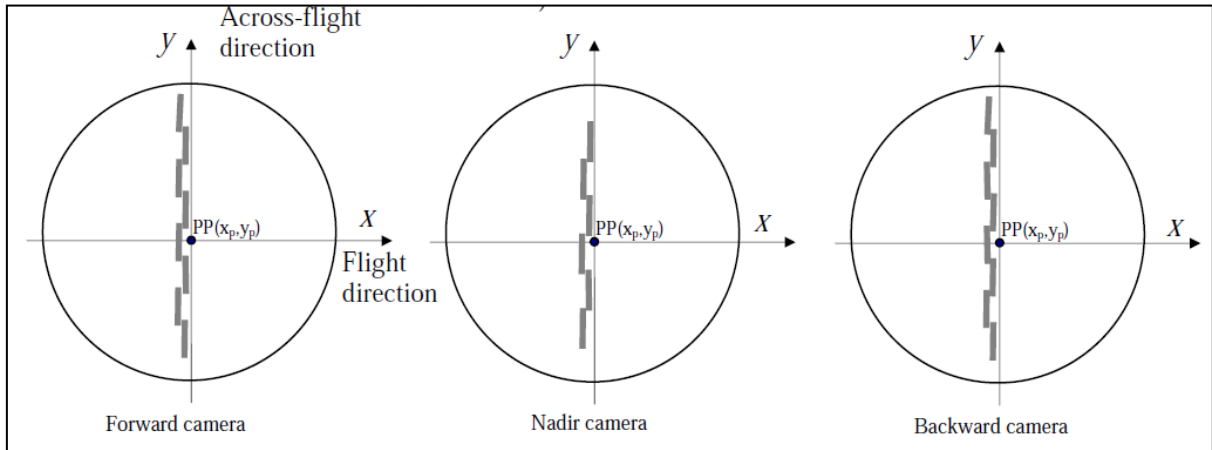


FIGURA 10 - ESTRUTURA DOS ARRANJOS CCD LINEARES DO SISTEMA ÓPTICO RÉ, NADIR E VANTE DO SENSOR PRISM.

FONTE: KOCAMAN (2007).

Como consequência desta estrutura, tem-se que cada matriz de CCD apresenta seu próprio SRM cuja origem é deslocada do PP. Segundo Tadono *et al.*, (2007a), há desalinhamentos significantes (acima de 2 pixels) entre as matrizes de CCD, isto impede que um sistema de coordenadas único seja utilizado após a fusão das imagens obtidas por cada uma das matrizes de CCD. Assim sendo, o plano focal de cada uma das câmeras do sensor PRISM incluem o PP com suas coordenadas, a distância focal, as posições das matrizes de CCD em relação ao PP e os tamanhos dos pixels nas matrizes de CCD (KOCAMAN, 2007).

Efetivamente, no modo triplo, do conjunto de 6 e 8 matrizes dos arranjos CCD linear dos sistemas ópticos nadir, e ré/vante respectivamente, eram escolhidos arbitrariamente um conjunto de pixels definidos sobre 4 matrizes, havendo 3 sobreposições de matrizes com 32 pixels. Neste conjunto, ainda eram suprimidos duas quantidades de pixels na parte extrema direita e esquerda (*left dummy* e *right dummy*). Como resultado final, as imagens dos tripletos disponibilizadas aos usuários apresentavam 14496 colunas e 16000 linhas cada uma (KOCAMAN; GRUEN, 2007b). No nível de processamento 1B1 são disponibilizadas as sub-imagens separadas, cabendo ao usuário utilizar um aplicativo apropriado para gerar a imagem completa. Nas Figuras 11 e 12 a seguir são apresentadas

respectivamente ilustrações do processo de montagem da imagem nadir e das imagens ré/vante no modo triplete.

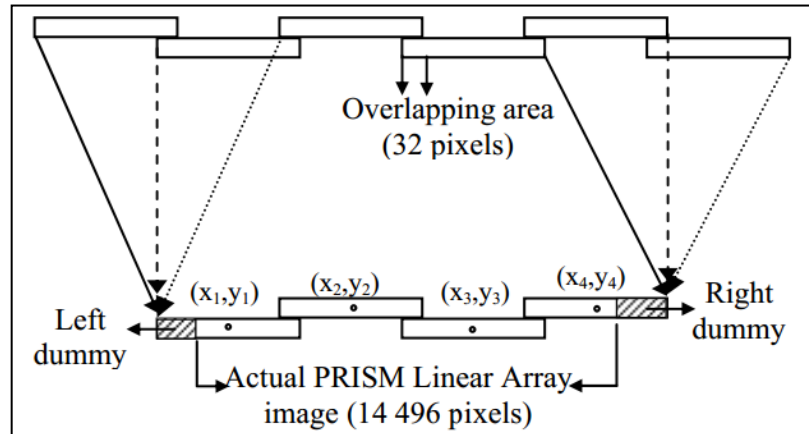


FIGURA 11 – ESTRUTURA DO ARRANJO CCD LINEAR DO SISTEMA ÓPTICO NADIR DO SENSOR PRISM.

FONTE: KOCAMAN (2007).

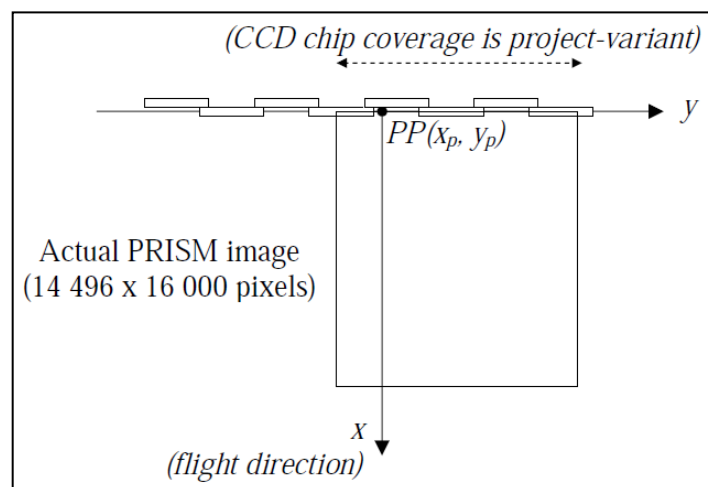


FIGURA 12 – ESTRUTURA DO ARRANJO CCD LINEAR DOS SISTEMAS ÓPTICOS RÉ E VANTE DO SENSOR PRISM.

FONTE: KOCAMAN (2007).

Os deslocamentos de cada matriz de CDD com relação ao PP, em cada uma das três câmeras, foram obtidos via processo de calibração geométrica em órbita e posteriormente disponibilizados pela JAXA juntamente com as distâncias focais das mesmas para os principais pesquisadores do Programa de Ciência ALOS (WESER *et al*, 2008b; KOCAMAN, 2007). Estes dados estão presentes atualmente no aplicativo BARISTA, desenvolvido pelo projeto 2.1 do *Cooperative Research*

Centre for Spatial Information (CRCSI) da Austrália (CRCSI, 2012; WESER *et al*, 2008b). A Tabela 2 a seguir apresenta os valores para cada uma das três câmeras do sensor PRISM.

TABELA 2 - POSIÇÃO DAS MATRIZES DE CCD, TAMANHO DOS PIXELS NAS MESMAS, DISTÂNCIAS FOCAIS, COORDENADAS DO PONTO PRINCIPAL DAS CÂMERAS DO SENSOR PRISM E TEMPO DE INTEGRAÇÃO DE IMAGEAMENTO DA (S) MATRIZ (ES) DE CCD FORNECIDOS PELA JAXA EM 2007.

Câmera Ré	
Distância focal (mm)	$f = 1999,8762715$
Tamanho do pixel nas matrizes de CCD (mm)	$PS = 0,007235$
Coordenadas do PP (mm)	$x_0 = 0,000000$ $y_0 = -0,138912$
Tempo de integração de imageamento das matrizes de CCD (s/linha)	$t_{CCD} = 0,00037$
Componentes do deslocamento da origem das matrizes de CCDs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 em relação ao PP (mm)	$dx_{matriz1} = 0.0276377$ $dy_{matriz1} = -142.16724355$ $dx_{matriz2} = 0.00441335$ $dy_{matriz2} = -106.68260725$ $dx_{matriz3} = 0,0082479$ $dy_{matriz3} = -71,24933945$ $dx_{matriz4} = 0,0117207$ $dy_{matriz4} = -35,84298585$ $dx_{matriz5} = 0,0046304$ $dy_{matriz5} = -0,4555156$ $dx_{matriz6} = -0,00759675$ $dy_{matriz6} = 34,93759795$
Câmera Nadir	
Distância focal (mm)	$f = 1999,8630195$
Tamanho do pixel nas matrizes de CCD (mm)	$PS = 0,007233$
Coordenadas do PP (mm)	$x_0 = 0,0000000$ $y_0 = 0,4173441$
Tempo de integração de imageamento das matrizes de CCD (s/linha)	$t_{CCD} = 0,00037$
Componentes do deslocamento da origem das matrizes de CCDs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 em relação	$dx_{matriz1} = -0.08563872$

ao PP (mm)	$dy_{matriz1} = -85.11700371$ $dx_{matriz2} = -0.04585722$ $dy_{matriz2} = -49.24197468$ $dx_{matriz3} = -0,01786551$ $dy_{matriz3} = -13,38401553$ $dx_{matriz4} = -0,00397815$ $dy_{matriz4} = 22,46403441$ $dx_{matriz5} = 0,03790092$ $dy_{matriz5} = 58,32452511$ $dx_{matriz6} = 0,05272857$ $dy_{matriz6} = 94,2025920$
Câmera Vante	
Distância focal (mm)	$f = 2000,0645632$
Tamanho do pixel nas matrizes de CCD (mm)	$PS = 0,007232$
Coordenadas do PP (mm)	$x_0 = 0,00000$ $y_0 = 0,003616$
Tempo de integração de imageamento das matrizes de CCD (s/linha)	$t_{ccd} = 0,00037$
Componentes do deslocamento da origem das matrizes de CCDs 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em relação ao PP (mm)	$dx_{matriz3} = -0.02364864$ $dy_{matriz3} = -70.99625472$ $dx_{matriz4} = 0.00477312$ $dy_{matriz4} = -35.613984$ $dx_{matriz5} = 0,00607488$ $dy_{matriz5} = -0,24292288$ $dx_{matriz6} = 0,00441152$ $dy_{matriz6} = 35,1236544$ $dx_{matriz7} = 0,00513472$ $dy_{matriz7} = 70,51583296$ $dx_{matriz8} = -0,01685056$ $dy_{matriz8} = 105,93896448$

FONTE: EXTRAÍDO DA VERSÃO DE TESTE DO APLICATIVO BARISTA.

2.4 ÓRBITA KEPLERIANA E PERTURBADA

A equação de movimento de um satélite artificial em torno de uma Terra esférica com distribuição de massa homogênea, sujeito apenas ao campo gravitacional desta é dada a partir da solução do Problema dos Dois Corpos (BATE *et al*, 1971; ESCOBAL, 1965; SEEGER, 2003), no qual o vetor aceleração do satélite é dado por:

$$\vec{\ddot{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r}, \quad (4)$$

onde $\vec{\ddot{r}}$ é o vetor aceleração em um SRCG, \vec{r} é o vetor posição da plataforma em um SRCG, M é a massa da Terra e G é a constante gravitacional universal ($6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Kg.s}^2$), de forma que por exemplo para o GRS 80, o valor é de $GM = 3,986005 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

A Equação (4) também é conhecida como Equação do Movimento Kepleriano. Este movimento é considerado uma primeira aproximação da órbita verdadeira do satélite, uma vez que não considera outras acelerações conhecidas como perturbações orbitais (SEEGER, 2003). Estas acelerações orbitais são forças atuantes de outras naturezas sobre o satélite.

Segundo Seeber (2003), entre os principais efeitos que fazem com que a órbita altere-se com o tempo estão a não esfericidade e não homogeneidade na distribuição da massa da Terra, além do seu achatamento, e também efeitos decorrentes do arrasto atmosférico, pressão de radiação solar e perturbações gravitacionais de outros corpos, notadamente da Lua e do Sol. Devido às estas perturbações, o movimento do satélite fica sujeito a acelerações adicionais. Deste modo, a Equação (4) torna-se:

$$\vec{\ddot{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \vec{A}, \quad (5)$$

onde \vec{A} representa as acelerações perturbadoras que atuam sobre o satélite. Selecionando as acelerações mais significativas, tem-se, por exemplo:

$$\vec{A} = \vec{A}_G + \vec{A}_{SL} + \vec{A}_{PR} + \vec{A}_{AL} + \vec{A}_M + \vec{A}_A + \dots, \quad (6)$$

onde \vec{A}_G é aceleração devido à atração gravitacional terrestre; \vec{A}_{SL} é a aceleração devido à atração gravitacional direta do Sol e da Lua; \vec{A}_{PR} é a aceleração devido à pressão de radiação solar; \vec{A}_{AL} é a aceleração devido ao albedo ou pressão de radiação solar indireta; \vec{A}_M é a aceleração devido à atração gravitacional indireta do Sol e da Lua, ou marés e; \vec{A}_A é a aceleração devido ao arrasto atmosférico.

2.4.1 Perturbação devido à atração gravitacional terrestre

De acordo com Leick (2004), o vetor aceleração devido ao campo gravitacional da Terra real é dado em um SRCG por:

$$\vec{A}_G = \left[\frac{\partial V}{\partial x_C} \quad \frac{\partial V}{\partial y_C} \quad \frac{\partial V}{\partial z_C} \right]^T, \quad (7)$$

onde V é o potencial gravitacional. A função V é uma função harmônica no exterior das massas planetárias e pode ser definida por (TORQUE, 2001):

$$V = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \vartheta) \right] , \quad (8)$$

onde P_{nm} é a Função Associada de Legendre:

$$P_{nm}(t) = \frac{1}{2^n n!} (1+t)^{\frac{m}{2}} \frac{d^{n+m}}{dt^{n+m}} (t^2 - 1)^n , \quad (9)$$

com:

$$t = \cos \vartheta , \quad (10)$$

onde C_{nm} e S_{nm} são os coeficientes dos harmônicos esféricos do potencial V ; a_e é o semi-eixo maior do Elipsoide de Referência utilizado e; ϑ e λ são a co-latidade e a longitude geocêntricas, referentes a uma esfera de mesmo volume que o Elipsoide de Referência adotado.

Os coeficientes dos harmônicos esféricos do potencial estão relacionados às deformações que a Terra apresenta em relação a uma Terra perfeitamente esférica (SEEBER, 2003). Para $m = 0$, $C_{n0} = -J_n$ e $S_{n0} = 0$, onde J_n são os harmônicos zonais deduzidos diretamente do potencial gravitacional terrestre. Quando $n = m$, os coeficientes dos harmônicos são chamados de setoriais e para $n \neq m$ são denominados de tesserais. O coeficiente $C_{00} = 1$ representa a Terra com distribuição esférica de massa, e, para a origem do sistema de coordenadas coincidindo com o centro de massa da Terra, tem-se: $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$ e $S_{00} = S_{n0} = 0$. Deste modo, a Equação (8) torna-se:

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \vartheta) \right], \quad (11)$$

Segundo Seeber (2003), Montenbruck e Gill (2000), Leick (2004) e Gemaël e Andrade (2004), o coeficiente zonal J_2 representa o efeito do achatamento da Terra no campo gravitacional, de modo que sua magnitude é aproximadamente 1000 vezes maior que os demais coeficientes dos harmônicos esféricos, o que o torna potencialmente mais significativo na determinação da aceleração devido à atração gravitacional terrestre. Ainda de acordo com Seeber (2003), a perturbação dominante em satélites de órbitas próximas da Terra é devido ao achatamento da mesma.

Considerando o exposto, segundo Leick (2004), para curtos períodos de tempo, é suficiente considerar apenas a contribuição do J_2 na aceleração devido ao campo gravitacional terrestre, uma vez que este em uma primeira aproximação é rotacionalmente simétrico, o que possibilita negligenciar as contribuições dos harmônicos tesserais. Deste modo, para $n = 2$ e $m = 0$, a Equação (11) em função de coordenadas referenciadas a um SRCG torna-se:

$$V = \frac{GM \cdot a_e^2}{r^3} J_2 \left(\frac{3}{2} \frac{Z_C^2}{r^2} - \frac{1}{2} \right), \quad (12)$$

de forma que as componentes da aceleração na Equação (5) levando em conta apenas a atração gravitacional terrestre e o coeficiente zonal J_2 podem ser obtidas por:

$$\begin{aligned}\ddot{X}_C &= -\frac{GM}{r^3}X_C - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}X_C\left(1 - 5\frac{Z_C^2}{r^2}\right), \\ \ddot{Y}_C &= -\frac{GM}{r^3}Y_C - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}Y_C\left(1 - 5\frac{Z_C^2}{r^2}\right), \\ \ddot{Z}_C &= -\frac{GM}{r^3}Z_C - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}Z_C\left(1 - 5\frac{Z_C^2}{r^2}\right).\end{aligned}\tag{13}$$

As Equações (13) podem ser adaptadas para o uso de coordenadas referenciadas a um SRT. Para isso, a velocidade angular de rotação da Terra ω_t deve ser levada em consideração. Uma vez que se desconsidera a precessão, a nutação e o movimento do polo estas equações devem ser utilizadas somente para pequenos intervalos de tempo (LEICK, 2004). Tem-se então:

$$\begin{aligned}\ddot{X} &= -\frac{GM}{r^3}X - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}X\left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right) + \omega_t^2X + 2\omega_t^2\dot{Y}, \\ \ddot{Y} &= -\frac{GM}{r^3}Y - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}Y\left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right) + \omega_t^2Y + 2\omega_t^2\dot{X}, \\ \ddot{Z} &= -\frac{GM}{r^3}Z - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}Z\left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right),\end{aligned}\tag{14}$$

onde X , Y , Z , \dot{X} , \dot{Y} , \ddot{X} , \ddot{Y} , e \ddot{Z} são respectivamente as componentes da posição, velocidade e aceleração em um SRT.

2.5 MODELAGEM RIGOROSA PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES DE VARREDURA LINEAR ORBITAIS

A modelagem rigorosa para a orientação de imagens provenientes de sensores de varredura linear orbitais requer a definição da orientação interior e da orientação exterior. Na sequência são apresentadas questões sobre o que são e como podem ser definidas as orientações interior e exterior.

2.5.1 Orientação interior

A orientação interior, ou modelo de sensor, está relacionada à definição de parâmetros geométricos internos ao sensor, os quais são necessários para a reconstrução dos feixes de raios que ligam pontos nos espaços objeto e imagem. A orientação interior é realizada desde que se tenham definidos os POI. Tradicionalmente na Fotogrametria aérea e terrestre, utilizando sensores de quadro, os POI incluem parâmetros do plano focal e do sistema de lentes. No que se refere ao plano focal tem-se: a distância focal (f), as coordenadas do PP (x_0, y_0), a dimensão do pixel (PS) na matriz de CCD e o número de colunas (n_c) da mesma. Já com relação aos POI associados ao sistema de lentes, têm-se os coeficientes das equações que modelam as distorções radiais simétricas (K_1, K_2, K_3), e os coeficientes das equações que modelam as distorções descentradas (P_1, P_2). Porém, quando se trata de sensores de varredura linear orbitais algumas características adicionais devem ser levadas em consideração.

Na grande maioria dos sensores de varredura linear orbitais, o arranjo da (s) matriz (es) de CCD no plano focal é do tipo de constituição em linha (item 2.1), no qual uma ou mais matrizes formam uma única linha da imagem (POLI, 2005). No caso de múltiplas matrizes, estas são colocadas uma ao lado da outra, ao longo da direção de um único eixo (normalmente o eixo x_c), conectadas por uma pequena sobreposição. Sensores como alguns embarcados nos satélites IRS-1C, Orbview-3, IKONOS-2, QUICKBIRD-2, Worldview 2, EROS A1 e B, ALOS, CBERS 1, 2 e 2B e Geoeye-1 são exemplos de sensores com múltiplas matrizes de arranjo de constituição em linha. Em teoria, no caso de múltiplas matrizes de CCD, estas devem ser exatamente alinhadas ou no mínimo paralelas, sendo as posições das mesmas em relação ao PP conhecidas no plano focal (JACOBSEN, 2005). Estas últimas são necessárias, pois em geral o Ponto Principal (PP) também não é coincidente com o centro geométrico do arranjo de matrizes (KOCAMAN, 2007), conforme foi apresentado no item 2.2.1. Porém, durante a fabricação imperfeições podem ocorrer, gerando pequenos deslocamentos bidirecionais, rotações, alterações de tamanho e até afastamento de linearidade (flexão) das matrizes (KOCAMAN, 2007; POLI, 2005; JACOBSEN, 2005).

As características geométricas bem como os efeitos das imperfeições de fabricação citadas constituem-se em erros sistemáticos. Parâmetros relacionados a estes erros devem fazer parte do conjunto de POI de sensores de varredura linear orbitais, podendo ser estimados antes do lançamento do satélite, a partir de uma calibração em laboratório. Porém, mesmo que haja este procedimento, uma reestimativa dos valores após o satélite ser colocado em órbita também deve ocorrer, ou seja, uma calibração geométrica em órbita, explicada mais adiante no item 2.6.

Ao considerar os diferentes POI dos sensores de varredura linear orbitais, Poli (2005) propôs uma separação para os mesmos, indicando os que estão relacionados com o sistema óptico e os que estão relacionados com as matrizes de CCD. Os POI relacionados ao sistema óptico compreendem as coordenadas do PP no plano focal, a variação da distância focal (Δf), os parâmetros de distorção radial simétrica e descentrada do sistema de lentes (K_1 , K_2 , K_3 e P_1 , P_2) e os coeficientes das variações de escala na direção dos eixos x_c e y_c (s_x e s_y). Já os POI relacionados com as matrizes CCD são os fatores de escala da mudança na dimensão do pixel na direção de x_s e y_s (p_x e p_y), o deslocamento bidimensional (a_0 e b_0) e as rotações (θ) das matrizes de CCD no plano focal com relação às suas posições nominais e o ângulo central do efeito da flexão (não linearidade geométrica - δ). Ainda segundo Kocaman (2007), os parâmetros de translação do centro geométrico da matriz de CCD em relação ao PP (dx , dy) também podem ser considerados POI relacionados com as matrizes de CCD. A seguir são apresentados os efeitos e os equacionamentos dos POI citados para sensores de varredura linear orbitais.

2.5.1.1 Parâmetros de orientação interior relacionados ao sistema óptico

A definição da posição do PP é decorrente da projeção ortogonal do CP da câmera no plano focal. Em um sistema de lentes ideal, o plano da imagem é exatamente perpendicular ao eixo óptico. Na realidade isto não ocorre. Considerando o sistema de lentes real, com imperfeições, o PP será deslocado de

sua posição nominal, assumindo coordenadas x_0 e y_0 , as quais são obtidas a partir da calibração da câmera em laboratório, utilizando, por exemplo, um goniômetro óptico. Estas coordenadas podem sofrer variações quando o sensor é colocado em órbita, e neste caso, devem ser reestimadas. Uma questão relevante a ser destacada é que este parâmetro é fortemente correlacionado com os parâmetros de deslocamento da (s) matriz (es) de CCD em relação ao PP. Deste modo, como opção pode-se utilizar o valor calibrado em laboratório fixado (injunção absoluta), de forma que os erros sistemáticos decorrentes deste procedimento possam ser absorvidos pelos seus parâmetros correlacionados citados. A correção do efeito sistemático causado pelo deslocamento do PP é efetuada simplesmente subtraindo as coordenadas do mesmo (x_0, y_0) das coordenadas do SRC (x_c, y_c).

Com relação à mudança Δf no valor calibrado em laboratório da distância focal f , esta causa um efeito sistemático de mudança de escala na matriz de CCD. A partir das equações a seguir é possível efetuar a correção sobre as coordenadas do SRC (POLI, 2005):

$$dx_f = -\frac{(x_c - x_0)}{f} \cdot \Delta f, \quad (15)$$

$$dy_f = -\frac{(y_c - y_0)}{f} \cdot \Delta f. \quad (16)$$

Na Fotogrametria aérea, o efeito sistemático do parâmetro Δf é similar ao efeito causado pela alteração da componente da altitude do avião. Porém, no caso da orientação de imagens orbitais, ao utilizar-se coordenadas X_S, Y_S e Z_S do CP do sensor referenciadas a um SRT não há similaridade de efeito entre Δf e as variações de Z_S , uma vez que suas direções não coincidem. Por outro lado, seja na orientação de imagens aéreas ou terrestres, o erro sistemático causado pelo parâmetro Δf cria um efeito de mudança de escala que apresenta forte correlação com os coeficientes da variação de escala do sistema óptico (s_x e s_y) e com os fatores de escala de mudança da dimensão do pixel na direção de x_s e y_s (p_x e p_y). Neste caso, pode-se considerar o valor de Δf fixado e igual à zero, e considerar apenas os parâmetros s_x e s_y , ou os parâmetros p_x e p_y . Uma forma de contornar tal situação é considerar os parâmetros s_x e s_y fixados e iguais a zero e considerar os parâmetros p_x e p_y diferentes para cada matriz de CCD (KOCAMAN, 2007).

As correções da variação de escala do sistema óptico sobre as coordenadas do SRC são dadas por:

$$dx_{sx} = s_x \cdot (x_c - x_0) , \quad (17)$$

$$dy_{sy} = s_y \cdot (y_c - y_0) , \quad (18)$$

onde s_x e s_y são os coeficientes de variação de escala na direção dos eixos x_c e y_c . É importante ressaltar que o maior efeito ocorre na direção de y_c , podendo ser desconsiderado sem prejuízo de exatidão o efeito na direção de x_c . Outra questão é que estes POI são fortemente correlacionados com os fatores de escala de mudança da dimensão do pixel na direção de x_s e y_s (p_x e p_y). Neste caso, pode-se considerar seus valores fixados e iguais a zero, e considerar apenas os parâmetros p_x e p_y . Similarmente ao caso anterior, uma forma de contornar tal situação é considerar os parâmetros p_x e p_y diferentes para cada matriz de CCD e fixar igual a zero o parâmetro Δf .

As distorções do sistema de lentes de acordo com a bem conhecida definição na Fotogrametria dividem-se em distorções radiais simétricas e distorções descentradas. O efeito da distorção radial simétrica é um deslocamento radial dos pontos na imagem a partir do ponto principal de simetria. O modelo de Brown (1971) para a correção do erro sistemático causado pela distorção radial simétrica nas coordenadas do SRC é dado por:

$$dx_r = K_1 r^2 \cdot (x_c - x_0) + K_2 r^4 \cdot (x_c - x_0) + K_3 r^6 \cdot (x_c - x_0) , \quad (19)$$

$$dy_r = K_1 r^2 \cdot (y_c - y_0) + K_2 r^4 \cdot (y_c - y_0) + K_3 r^6 \cdot (y_c - y_0) , \quad (20)$$

com:

$$r = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2} , \quad (21)$$

onde K_1 , K_2 e K_3 são os parâmetros de distorção radial simétrica, os quais podem alterar-se em relação aos valores calibrados em terra, durante o lançamento do satélite e quando o satélite encontra-se em órbita, devido a diferença de temperatura.

A distorção descentrada é causada pelo não alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõem a objetiva da câmera, causando deslocamentos dos pontos na imagem. Esta distorção é composta pela distorção tangencial e radial assimétrica. O modelo de Brown (1976) para a correção do erro sistemático causado pela distorção descentrada das lentes nas coordenadas do SRC é dado por:

$$dx_d = (r^2 + 2(x_c - x_0)^2)P_1 + 2(x_c - x_0)(y_c - y_0)P_2, \quad (22)$$

$$dy_d = (r^2 + 2(y_c - y_0)^2)P_2 + 2(x_c - x_0)(y_c - y_0)P_1, \quad (23)$$

onde P_1 e P_2 são os parâmetros da distorção descentrada, os quais também podem alterar-se em relação ao valores calibrados em terra, após o lançamento do satélite.

Uma questão a ser destacada é que para que seja possível a estimativa dos parâmetros P_1 e P_2 , no bloco de imagens deve haver pelo menos uma imagem com um giro de 90° em torno do eixo óptico da câmara com relação à faixa de voo (ANDRADE, 2003). Desta forma, os parâmetros P_1 e P_2 são estimáveis apenas na Fotogrametria aérea.

2.5.1.2 Parâmetros de orientação interior relacionados às matrizes de CCD

Como apresentado no item 2.1 os sensores de varredura linear com arranjo de constituição em linha podem ser compostos por uma ou mais matrizes de CCD no plano focal. Independente da quantidade de matrizes, os parâmetros deste conjunto são aplicados a cada uma separadamente.

Seja após a fabricação ou durante e após o lançamento do satélite, as dimensões dos pixels na (s) matriz (es) de CCD na direção de x_s e y_s podem ser alteradas. Tais alterações podem ser modeladas a partir da consideração de dois fatores de escala (p_x e p_y). Para fins de simplificação considera-se que todos os pixels de uma dada matriz de CCD apresentam os mesmos fatores de escala, neste caso, o que acaba ocorrendo na realidade é um aumento ou diminuição da matriz em relação ao seu valor nominal. A Figura 13 ilustra o efeito dos parâmetros p_x e p_y , onde l e l' são respectivamente os tamanhos da matriz nominal e alterado.

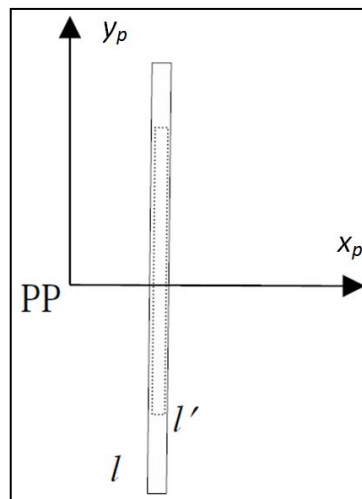


FIGURA 13 – EFEITO DA ALTERAÇÃO DE TAMNHO DA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL.
(ADAPTADO DE KOCAMAN, 2007).

A correção do erro sistemático causado pela mudança do tamanho dos pixels na matriz de CCD tem efeito significativo apenas na direção do eixo y_s . Deste modo, a correção para a coordenada y_s é:

$$dy_{ps} = -y_s \cdot \frac{p_y}{p_s}. \quad (24)$$

As rotações θ das matrizes de CCD, em relação ao eixo y_s , são medidas em relação às posições nominais, ou seja, em relação ao eixo perpendicular ao deslocamento do satélite na órbita (y_s) e deveriam ser iguais à zero. Normalmente estas rotações são pequenas e ocorrem no processo de montagem do arranjo de CCD no plano focal. Durante o lançamento, acelerações duras são impostas ao satélite e uma alteração no valor da rotação calibrado em laboratório pode ocorrer (Figura 14).

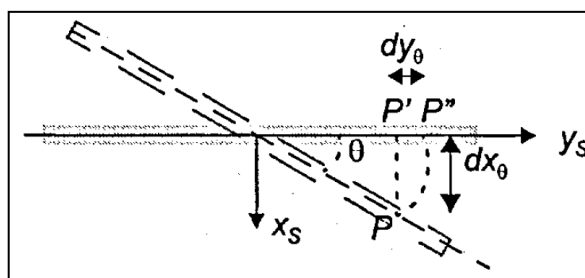


FIGURA 14 – EFEITO DA ROTAÇÃO DE UMA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL.
FONTE: (POLI, 2005).

A partir da Figura 14 pode-se notar que o erro sistemático causado pela rotação θ na direção y_s é igual à distância de P' (projeção ortogonal de P para o eixo y_s) para P'' (posição de P quando $\theta = 0^\circ$). Neste caso tem-se:

$$dy_\theta = y_s - y_s \cdot \cos \theta = y_s(1 - \cos \theta) . \quad (25)$$

Por outro lado, para a coordenada x_s tem-se a correção:

$$dx_\theta = y_s \cdot \sin \theta . \quad (26)$$

Os valores nominais de dx e dy referentes aos deslocamentos bidimensionais dos centros das matrizes de CCD em relação ao PP no plano focal podem se alterar. Se os valores calibrados em terra estiverem disponíveis, pode-se refinar os mesmos no processo de ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos, a partir da aplicação de injunções relativas, utilizando a Equação (3) inserida nas equações de colinearidade. Uma alternativa é considerar parâmetros corretivos de dx e dy como incógnitas nos ajustamentos de observações. Neste último caso tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} , \quad (27)$$

onde a_0 e b_0 são os termos referentes às alterações sistemáticas de dx e dy .

O efeito de flexão horizontal das matrizes de CCD é causado pela não linearidade geométrica das mesmas. Em vez de se ter uma linha reta, tem-se uma forma de arco (Figura 15). Para modelar este formato pode-se imaginar uma circunferência que contém o arco, com ângulo central δ e raio r (Figura 15), sendo este último calculado a partir do nº de colunas da matriz de CCD, da dimensão do pixel e de δ (POLI, 2005):

$$r = \frac{n_c \cdot PS}{2 \cdot \sin \frac{\delta}{2}} \quad (28)$$

O efeito da flexão horizontal da matriz de CCD é significativo apenas na direção x_s , dependendo da posição ocupada pelo pixel na matriz, sendo máxima no centro da matriz e nula nas bordas (Figura 15). Para um valor qualquer de y_s , a correção dx_δ sobre x_s é dada por (POLI, 2005):

$$dx_\delta = -\left(r \cdot \cos \delta' - r \cdot \cos \frac{\delta}{2}\right) = -r \left(\cos \delta' - \cos \frac{\delta}{2}\right), \quad (29)$$

sendo ângulo δ' o ângulo entre o eixo x_s e a direção do pixel de coordenada y_s considerado na matriz de CDD (Figura 15).

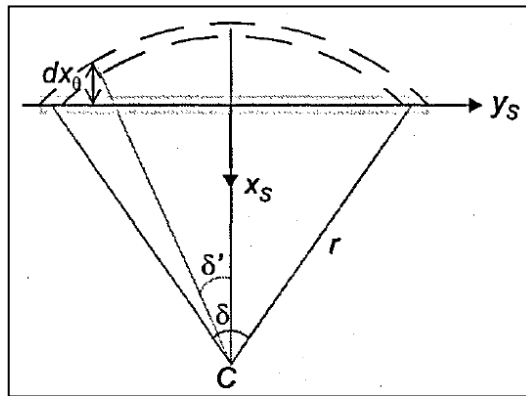


FIGURA 15 – EFEITO DA FLEXÃO HORIZONTAL DE UMA MATRIZ DE CCD NO PLANO FOCAL (POLI, 2005).

O valor aproximado de δ' pode ser obtido por:

$$\delta' \approx \frac{y_s}{r}, \quad (30)$$

com intervalo de variação entre 0 e $\delta/2$. O POI a ser estimado é o com ângulo central δ . O efeito da flexão vertical, ou seja, o afastamento do paralelismo da linha CCD em relação ao plano focal pode ser absorvido pelo efeito da mudança do tamanho dos pixels na direção y_s (dy_{ps}).

Outro tipo de equacionamento apresentado por Kocaman (2007) para este erro sistemático, adaptado para a correção de apenas uma matriz de CCD é:

$$dx_\delta = y_s(x_s^2 + y_s^2)\delta. \quad (31)$$

2.5.2 Orientação exterior

A orientação exterior está relacionada com a definição da posição do CP e a orientação do sensor, no momento da aquisição da imagem, seja ela bidimensional, obtidas a partir de sensores de quadro; ou unidimensional, obtidas a partir de sensores de varredura linear. Trata-se da estimativa dos POE, a saber: três componentes do vetor posição, em um sistema de coordenadas tridimensionais do espaço objeto (X_s , Y_s , Z_s); e três componentes angulares de orientação. As componentes de orientação são associadas aos denominados ângulos de Euler (rolamento - R , arfagem - P e guinada - Ψ), também conhecidos como ângulos de atitude do satélite. Estes são referenciados a um sistema de coordenadas definido de acordo com a direção dos eixos físicos do movimento do satélite, com origem no CP do sensor. O eixo de rolamento é definido pela direção a qual ocorre a trajetória do satélite, o eixo de guinada é definido pela direção que aponta para o centro de massa da Terra e o eixo de arfagem é definido tornando o sistema dextrógiro. O sentido positivo dos ângulos é o sentido anti-horário.

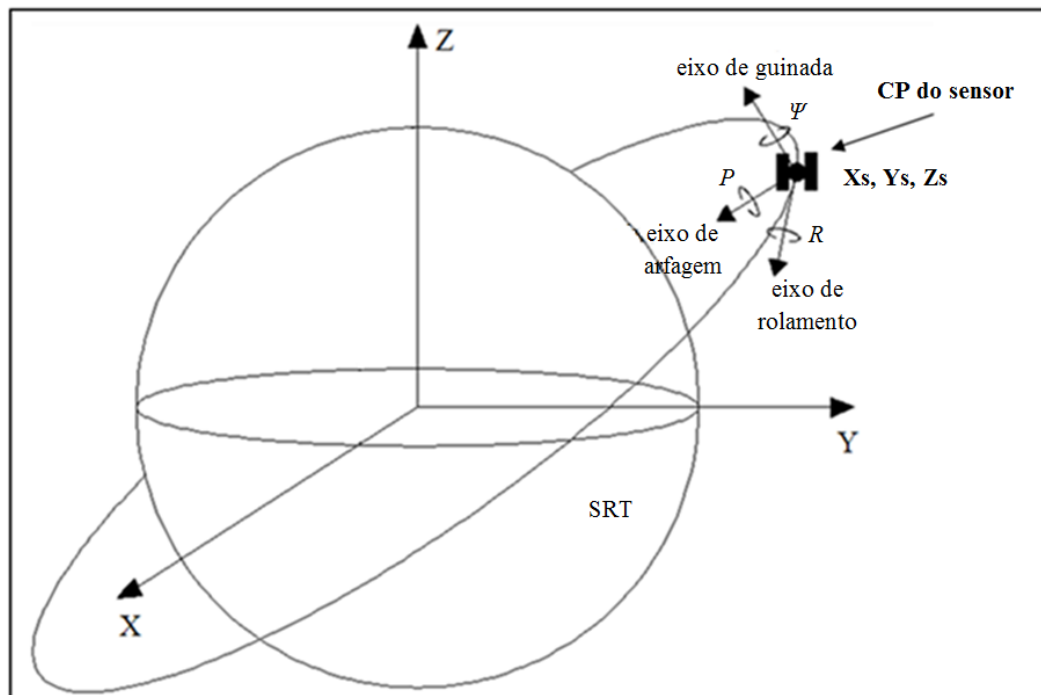


FIGURA 16 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR (POE).

FONTE: O AUTOR (2012).

A forma de obtenção dos POE pode se dar diretamente ou indiretamente. A forma direta ocorre quando existem dados disponíveis aos usuários de rastreo de órbita para a determinação das posições do satélite, ou ainda quando se encontram embarcados receptores GNSS para o mesmo propósito, e; dados de sensores de estrela para a determinação dos ângulos de atitude. A orientação exterior com obtenção direta dos POE e posterior aplicação no modelo matemático rigoroso é denominada de georreferenciamento direto. Em contrapartida, na falta de dados diretos, a forma indireta estima os POE em um ajustamento de observações, a partir do uso da modelagem rigorosa e de feições de controle em campo, tais como pontos, retas ou polígonos com coordenadas terrestres e de imagem conhecidas.

Uma questão a ser destacada é que os POE obtidos de forma direta apresentam incertezas que tornam o georreferenciamento direto para algumas aplicações inviável. Desta forma, há a possibilidade de refinar os POE a partir de um ajustamento de observações com injunções relativas de peso ou utilizando termos corretivos. Nas duas metodologias, necessita-se de feições de controle em campo com coordenadas terrestres e de imagem conhecidas para a montagem do sistema de equações redundante para o ajustamento.

No caso de imagens de sensores de varredura linear haverá um conjunto de POE para cada linha da imagem bidimensional. Neste caso, para realizar a orientação exterior destas imagens deve-se dispor de uma modelagem matemática que permita interpolar e extrapolar valores dos diversos conjuntos de POE, entre as diversas linhas da imagem. Esta modelagem é definida a partir do denominado modelo de plataforma.

Após definidos os POI e os POE, pode-se relacionar matematicamente coordenadas do SRI com coordenadas de sistemas tridimensionais do espaço objeto a partir das denominadas equações de colinearidade.

2.5.3 Modelagem matemática

A modelagem matemática rigorosa para orientação de imagens orbitais baseia-se no Princípio de Colinearidade entre um ponto no espaço imagem, o CP do

sensor e um ponto no espaço objeto (Figura 17). Para tanto são utilizadas as denominadas equações de colinearidade. No caso de sensores de varredura linear estas equações são modificadas com o objetivo de se adequar a geometria de imageamento. Uma vez que há apenas uma linha, nos casos em que o PP é considerado alinhado com o centro geométrico do arranjo da (s) matriz (es) de CCD no plano focal ($dx = 0$), a componente x_c do SRC pode ser aproximada como zero (GUGAN; DOWMAN, 1988). Caso contrário, se $dx \neq 0$, a componente x_c do SRC não poderá ser aproximada como zero. Além disso, deve-se incluir o modelo de plataforma na orientação exterior.

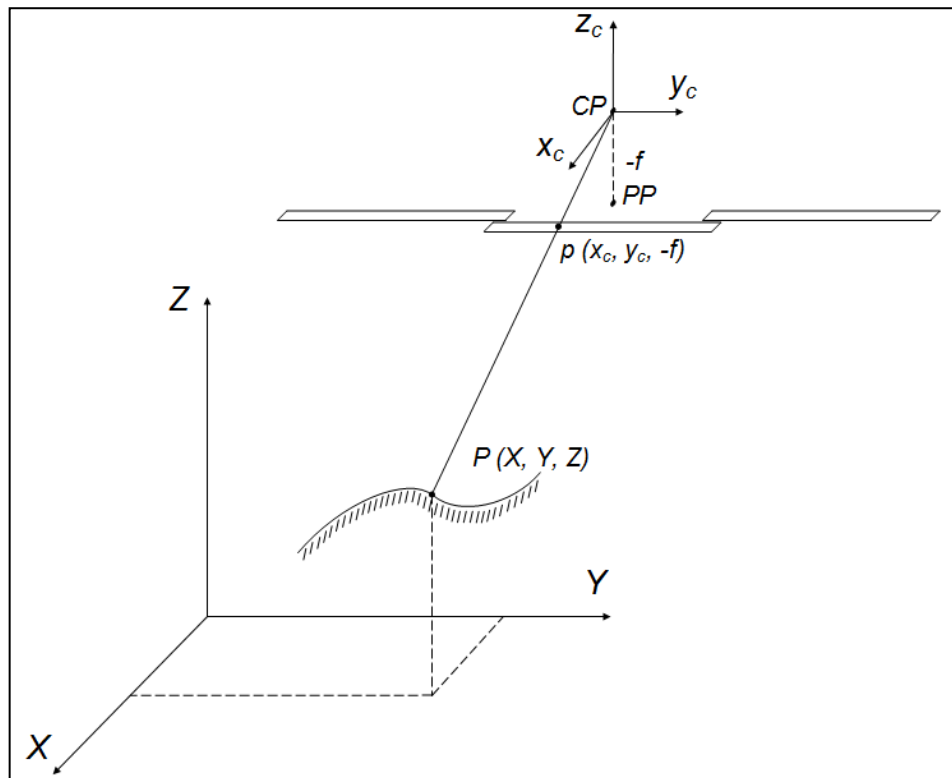


FIGURA 17 - PRINCÍPIO DA COLINEARIDADE APLICADA A SENSORES DE VARREDURA LINEAR COM ARRANJO DE CONSTITUIÇÃO EM LINHA.

FONTE: O AUTOR (2012).

Nos casos de orientação simultânea de duas ou mais imagens, pode-se realizar a fototriangulação. De forma tradicional, segundo Lugnani (1987), a fototriangulação é definida como sendo um método fotogramétrico no qual se determina as coordenadas dos pontos no espaço objeto (pontos fotogramétricos) por meio da relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas, de um

esparso controle de campo e de um conjunto de valores aproximados de parâmetros.

Atualmente, pode-se dizer que o principal objetivo da fototriangulação é, além de estimar coordenadas tridimensionais pertencentes ao espaço objeto, estimar ou refinar os POE de cada imagem, os quais podem ser utilizados diretamente em processos posteriores, como na triangulação, na geração de MDT e MDS, de ortoimagens e na restituição. Isto é realizado a partir do conceito da denominada fototriangulação com o ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos (*Bundle Adjustment*). Nesta metodologia estimam-se ou refinam-se simultaneamente os POE para todas as imagens pertencentes ao bloco, bem como as coordenadas do espaço objeto dos pontos fotogramétricos.

Mesmo partindo do princípio de colinearidade, de uma forma geral, os modelos rigorosos podem ser separados em duas classes, a saber: modelo Posição-Rotação e modelo Órbita-Atitude (KIM; DOWMAN, 2006).

2.5.3.1 Modelo Órbita-Atitude

No modelo Órbita-Atitude, para o alinhamento do sistema de referência do espaço imagem com o sistema de referência do espaço objeto são considerados dois sistemas de referência intermediários. Estes são: o Sistema de Referência da Plataforma (SRP) e o Sistema de Referência Orbital (SRO). Deste modo, são utilizados então o SRC, o SRP, o SRO e um SRT.

O SRP é um sistema dextrógiro com origem no centro de massa do satélite (CMS). A direção dos eixos é definida a partir da direção dos eixos do SRC, aplicando-se uma série de rotações em função dos denominados ângulos de *boresight*, b_x , b_y e b_z (MACHADO E SILVA, 2007). A matriz de rotação que leva do SRC para o SRP é dada por:

$$R_{PS} = \begin{bmatrix} \cos(b_z) \cos(b_y) & \cos(b_z) \sin(b_y) \sin(b_x) + \sin(b_z) \cos(b_x) & -\cos(b_z) \sin(b_y) \cos(b_x) + \sin(b_z) \sin(b_x) \\ -\sin(b_z) \cos(b_y) & -\sin(b_z) \sin(b_y) \sin(b_x) + \cos(b_z) \cos(b_x) & \sin(b_z) \sin(b_y) \cos(b_x) + \cos(b_z) \sin(b_x) \\ \sin(b_y) & -\cos(b_y) \sin(b_x) & \cos(b_y) \cos(b_x) \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Para compatibilizar as origens do SRC com o SRP, basta aplicar um vetor de translações (dX , dY , dZ) entre o CMS e o CP do sensor. Estas translações, bem como os ângulos de *boresight* podem ser estimadas antes do lançamento satélite e posteriormente a partir de calibração em órbita.

O SRO também é um sistema dextrógiro com origem no centro de massa do sensor, porém, o que o difere do SRP é a orientação dos eixos. O eixo z aponta para o centro de massa da Terra, o eixo x aponta para o sentido do deslocamento da plataforma na órbita e o eixo y completa o sistema dextrógiro triortogonal. Para realizar a passagem do SRP para o SRO são utilizados os ângulos de atitudes físicos da plataforma (MACHADO E SILVA, 2007), definidos no item 2.5.2. A matriz de rotação que se encarrega da transformação é dada por:

$$R_{OP} = R_3(\Psi)R_2(P)R_1(R). \quad (33)$$

Neste ponto, cabe dizer aqui que os dados de atitude do satélite na órbita disponibilizados nos arquivos auxiliares das imagens podem ser utilizados diretamente na Equação (33).

Para a passagem do SRO para um SRT aplica-se a matriz de rotação (JOVANOVIĆ *et al.*, 1999; POLI, 2005):

$$R_{TO} = \begin{bmatrix} \frac{V_X}{L_V} & \frac{-Y_S V_Z + V_Y Z_S}{L_V L_P} & -\frac{X_S}{L_P} \\ \frac{V_Y}{L_V} & \frac{-Z_S V_X + V_Z X_S}{L_V L_P} & -\frac{Y_S}{L_P} \\ \frac{V_Z}{L_V} & \frac{-X_S V_Y + V_X Y_S}{L_V L_P} & -\frac{Z_S}{L_P} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

onde V_X , V_Y e V_Z são as componentes do vetor velocidade; X_S , Y_S e Z_S são as componentes do vetor posição do satélite; L_P é a magnitude do vetor posição; e L_V é a magnitude do vetor velocidade, todos referenciados a um SRT.

Considerando todas as transformações entre os referenciais e ainda o princípio de colinearidade entre um ponto i no espaço objeto, o seu correspondente no espaço imagem e o CP do sensor no instante da tomada da imagem, tem-se a seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i R_{PS}^T \left(R_{OP}(t)^T R_{TO}(t)^T \begin{bmatrix} X_i - X_S(t) \\ Y_i - Y_S(t) \\ Z_i - Z_S(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \right). \quad (35)$$

Dividindo a primeira e a segunda equação obtidas da Equação (35) pela terceira, o fator de escala para o ponto i (λ_i) é cancelado, obtendo-se então as equações de colinearidade adaptadas. Se dX , dY e dZ foram iguais à zero tem-se:

$$x_c = -f \frac{r_{11}'(X_i - X_S(t)) + r_{12}'(Y_i - Y_S(t)) + r_{13}'(Z_i - Z_S(t))}{r_{31}'(X_i - X_S(t)) + r_{32}'(Y_i - Y_S(t)) + r_{33}'(Z_i - Z_S(t))}, \quad (36)$$

$$y_c = -f \frac{r_{21}'(X_i - X_S(t)) + r_{22}'(Y_i - Y_S(t)) + r_{23}'(Z_i - Z_S(t))}{r_{31}'(X_i - X_S(t)) + r_{32}'(Y_i - Y_S(t)) + r_{33}'(Z_i - Z_S(t))}, \quad (37)$$

onde X_i , Y_i , Z_i e $X_S(t)$, $Y_S(t)$ e $Z_S(t)$ são respectivamente coordenadas cartesianas tridimensionais no espaço objeto de um ponto i qualquer e do CP do sensor em um instante t ; x_c , y_c são as coordenadas do SRC; f é a distância focal calibrada do sensor e; r_{11}' , ..., r_{33}' são os componentes da matriz de rotação $R(t) = R_C^{PT} R_P^O(t)^T R_O^T(t)^T$ em um dado instante t .

As duas primeiras matrizes de rotação são particulares para cada sistema sensor, uma vez que a primeira é associada à estrutura da plataforma e a segunda depende da ordem de rotação e da definição dos eixos.

Neste modelo, os POE são os ângulos de atitude, as componentes da posição e da velocidade do CP e os coeficientes polinomiais dos polinômios de 2º grau que modelam as mudanças das quantidades citadas em função do tempo. O modelo de plataforma é dado por:

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2, \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2, \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2, \\ V_x &= V_{x0} + a_4 t + b_4 t^2, \\ V_y &= V_{y0} + a_5 t + b_5 t^2, \\ V_z &= V_{z0} + a_6 t + b_6 t^2, \end{aligned} \quad (38)$$

$$R = R_0 + a_7 t + b_7 t^2,$$

$$P = P_0 + a_8 t + b_8 t^2,$$

$$\Psi = \Psi_0 + a_9 t + b_9 t^2,$$

onde $X_0, Y_0, Z_0, V_{X0}, V_{Y0}, V_{Z0}$ são as componentes da posição e velocidade do satélite em um SRT no instante $t = 0$; R_0, P_0 e Ψ_0 representam os ângulos de atitude no instante $t = 0$; $a_1, b_1, \dots, a_9, b_9$ são os coeficientes polinomiais e; t é o tempo associado a uma determinada linha da imagem.

Cabe ressaltar que conforme indica Marcato Júnior *et al.* (2011) os parâmetros de velocidade apresentam forte correlação com os parâmetros de posição, pois a velocidade é calculada por meio da diferença de posição em um determinado intervalo de tempo. Portanto, os parâmetros $V_{X0}, a_4, b_4, V_{Y0}, a_5, b_5, V_{Z0}, a_6$ e b_6 devem ser calculados antes do processo de orientação, e seus valores devem entrar fixados com injeção absoluta no ajustamento de observações realizado no processo de orientação da imagem.

2.5.3.2 Modelo Posição-Rotação

O modelo Posição-Rotação é o modelo primeiramente desenvolvido e mais utilizado nos aplicativos comerciais como o *Leica Photogrammetry Suite*. A diferença entre este modelo e o modelo Órbita-Atitude é que para o alinhamento do sistema de referência do espaço imagem com o do espaço objeto são considerados apenas o SRC e um SRT (ou um SRCG). Deste modo, apenas uma matriz de rotação é definida, sendo obtida em função de ângulos de atitude sem significado físico, ou seja, em desacordo com o especificado no item 2.5.2. Estes ângulos são denominados de *omega, phi* e *kappa* (ω, φ, κ). Esta característica impede que os dados de órbita provenientes dos metadados das imagens (R, P, ψ) sejam utilizados diretamente neste modelo. A matriz de rotação única em função de ω, φ, κ , os quais variam no tempo, é dada por:

$$R(t) = R_3(\kappa(t))R_2(\varphi(t))R_1(\omega(t)), \quad (39)$$

Considerando apenas os dois sistemas citados, as equações de colinearidade modificadas para sensores de varredura linear são:

$$x_c = -f \frac{r_{11}(t)[X_i - X_S(t)] + r_{12}(t)[Y_i - Y_S(t)] + r_{13}(t)[Z_i - Z_S(t)]}{r_{31}(t)[X_i - X_S(t)] + r_{32}(t)[Y_i - Y_S(t)] + r_{33}(t)[Z_i - Z_S(t)]}, \quad (40)$$

$$y_c = -f \frac{r_{21}(t)[X_i - X_S(t)] + r_{22}(t)[Y_i - Y_S(t)] + r_{23}(t)[Z_i - Z_S(t)]}{r_{31}(t)[X_i - X_S(t)] + r_{32}(t)[Y_i - Y_S(t)] + r_{33}(t)[Z_i - Z_S(t)]}, \quad (41)$$

onde X_i , Y_i , Z_i e $X_S(t)$, $Y_S(t)$ e $Z_S(t)$ são respectivamente coordenadas cartesianas tridimensionais no espaço objeto de um ponto i qualquer e do CP do sensor em um instante t e; $r_{11}(t)$, ..., $r_{33}(t)$ são os elementos da matriz de rotação $R(t)$, responsável por alinhar o SRC com o SRT utilizado em um dado instante t .

Uma vez que há apenas o SRC e um SRT envolvidos no processo, os POE são definidos pelos ângulos de atitude não físicos, pelas componentes da posição do CP e pelos coeficientes dos polinômios responsáveis por modelar as mudanças de posição e orientação do CP durante a formação da cena. O modelo de plataforma para este modelo pode ser definido utilizando-se polinômios de 1º, 2º ou até 3º grau. Conforme indicado primeiramente por Guban e Dowman (1988), tem-se o modelo utilizando polinômios de 2º grau em função do tempo:

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2, \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2, \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2, \\ \omega &= \omega_0 + a_4 t + b_4 t^2, \\ \varphi &= \varphi_0 + a_5 t + b_5 t^2, \\ \kappa &= \kappa_0 + a_6 t + b_6 t^2, \end{aligned} \quad (42)$$

onde X_0 , Y_0 , Z_0 e ω_0 , φ_0 , κ_0 são respectivamente as componentes da posição e da orientação do CP do sensor na primeira linha da imagem; a_1 , b_1 , ..., a_6 , b_6 são os coeficientes polinomiais da modelagem de mudança nos POE e; t é um dado instante de tempo da formação da cena. Percebe-se que neste tipo de modelo não há a utilização das componentes da velocidade, uma vez que não é considerada a transformação da Equação (34). Porém, as componentes da posição e orientação

utilizam polinômios da mesma forma para a sua propagação durante a formação da imagem.

Ao analisar o uso de coordenadas do espaço objeto referenciadas ao Sistema Geodésico Local (SGL) ou ao Sistema de coordenadas UTM, Orun e Natarajan (1994) indicaram que o conjunto de 18 parâmetros das equações anteriores apresenta problemas de forte correlação. Devido à própria característica física da aquisição de cenas por sensores de varredura linear, pequenas mudanças em ω tem o mesmo efeito que pequenas mudanças em Y_s e; pequenas mudanças em φ assemelham-se muito às pequenas mudanças em X_s (Figura 18). Ou seja, uma vez que os efeitos destes movimentos são muito próximos, sua determinação indireta é instável, devido à forte correlação. Neste caso, há a necessidade de se considerar como constante (injunção absoluta) ou ω ou Y_s e φ ou X_s do conjunto de parâmetros, totalizando um conjunto de 12 parâmetros resultantes para cada imagem. Além disso, estes autores também indicaram que, uma vez que a estimativa da diferença de tempo (t) é função linear da coordenada L do SRI, pode-se admitir que L substitui a variação de tempo t , e as mudanças em unidades (fator de escala entre t e L) podem ser absorvidas pelos coeficientes a_i e b_i , sendo i o grau do polinômio. Desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 L_s + b_1 L_s^2, \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 L_s + b_2 L_s^2, \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 L_s + b_3 L_s^2, \\
 \omega &= cte, \\
 \varphi &= cte, \\
 \kappa &= \kappa_0 + a_4 L_s + b_4 L_s^2.
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

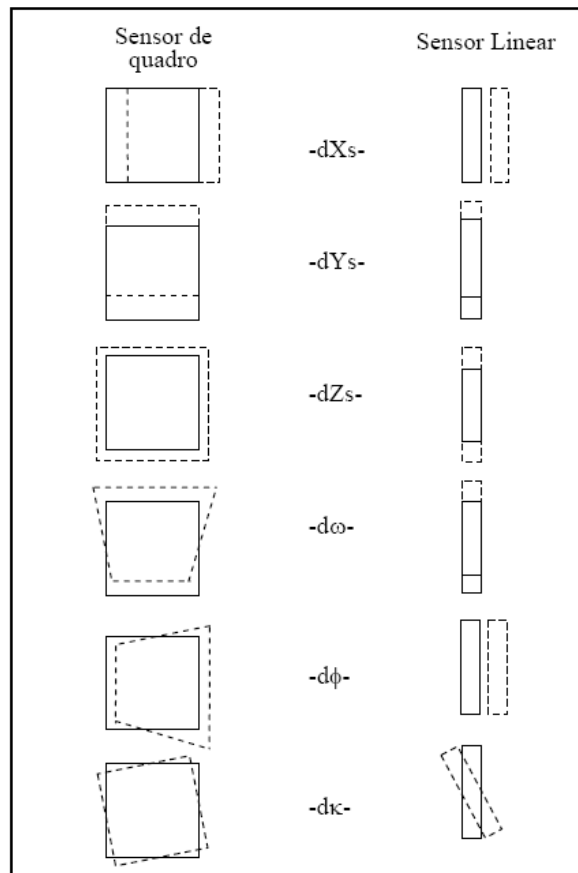


FIGURA 18 - EFEITO DE PEQUENAS MUDANÇAS NOS PARÂMETROS PARA CÂMARAS *FRAME* E SENSORES DE VARREDURA LINEAR.

FONTE: ADAPTADA DE ORUN E NATARAJAN (1994)

2.5.3.3 Modelo de plataforma UCL

Baseado no princípio que a propagação da posição da plataforma é modelada através de um polinômio de segundo grau, Michalis e Dowman (2005) analisaram fisicamente o processo de formação da cena, e associaram os coeficientes lineares com a velocidade da plataforma e os termos quadráticos com as acelerações. Este modelo de plataforma foi denominado de modelo UCL. As acelerações foram associadas ao Problema dos Dois Corpos e a parte do modelo da plataforma referente à posição do CP do sensor foi definida partindo-se da teoria do movimento uniformemente variado – MUV (Equações 44).

O ponto principal deste modelo é que o vetor de estado da primeira linha da primeira imagem é utilizado na fototriangulação para realizar a orientação exterior das demais imagens da faixa. O ponto de ligação utilizado é o intervalo de tempo entre o início da formação da primeira linha da primeira imagem, e o início da formação da primeira linha das demais imagens da faixa. Esta situação é apresentada no modelo de plataforma:

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + u_x \tau - \frac{GM \cdot X_0 \cdot \tau^2}{2 \cdot (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2)^{3/2}}, \\ Y_s &= Y_0 + u_y \tau - \frac{GM \cdot Y_0 \cdot \tau^2}{2 \cdot (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2)^{3/2}}, \\ Z_s &= Z_0 + u_z \tau - \frac{GM \cdot Z_0 \cdot \tau^2}{2 \cdot (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2)^{3/2}}, \end{aligned} \quad (44)$$

com

$$\tau = t + dt, \quad (45)$$

onde X_0 , Y_0 , Z_0 e u_x , u_y , u_z são respectivamente as componentes da posição e da velocidade do CP do sensor da primeira linha da primeira imagem da faixa; t é o tempo associado à aquisição das linhas da primeira imagem; e dt é o intervalo de tempo entre a formação da primeira linha da primeira imagem e a primeira linha das demais imagens da faixa. Particularmente para o tripleto PRISM – ALOS tem-se:

$$\tau = t, \quad (46)$$

$$\tau = t + dt_{12}, \quad (47)$$

$$\tau = t + dt_{13}, \quad (48)$$

para a primeira, segunda e terceira imagem do tripleto respectivamente, sendo $dt_{12} = 45$ segundos e $dt_{13} = 90$ segundos.

A parte do modelo de plataforma referente aos ângulos de orientação da câmera pode ser considerada constante durante o tempo de imageamento (MICHALIS, 2005; MICHALIS; DOWMAN, 2005), ou pode ser propagada por polinômios (MICHALIS; DOWMAN, 2010; RODRIGUES, 2011), dependendo das características do movimento do satélite durante o processo de aquisição das

imagens. Um exemplo de alteração para cenas PRISM-ALOS pode ser visto em Dowman *et al.*, (2011). Outro ponto a ser destacado é que este modelo de plataforma foi desenvolvido e utilizado em conjunto com o modelo rigoroso do tipo Posição-Rotação.

Uma importante questão no uso deste modelo é que as coordenadas do espaço objeto de pontos de controle ou verificação devem estar referenciadas a um SRCG, por conta da consideração do Problema dos Dois Corpos. Desta forma, como um primeiro passo antes da orientação, as coordenadas, tanto dos pontos de controle como os de verificação, coletadas originalmente em um SRT, devem ser transformadas em coordenadas referenciadas a um SRCG.

Para a utilização destes modelos, algumas considerações e indicações são apresentadas conforme descrito em Michalis e Dowman (2005):

- as cenas são adquiridas com um intervalo de tempo constante de aquisição das linhas;
- a orientação das imagens deve ser realizada em um Sistema de coordenadas geocêntrico, a fim de evitar distorções causadas pela curvatura da Terra e para facilitar a integração com fontes de informações de metadados que podem estar disponíveis;
- o movimento do satélite durante o tempo de aquisição de imagens estéreo *along track* é considerado um movimento Kepleriano. Para tanto deve ser utilizado um sistema de coordenadas inercial.

Exemplos de aplicação deste modelo podem ser vistos em Dowman e Michalis (2003) utilizando cenas ASTER; Michalis e Dowman (2004), Michalis (2005), Michalis e Dowman (2006), Michalis e Dowman (2008a) com cenas HRS-SPOT 5; Michalis e Dowman (2008b) com cenas do satélite CARTOSAT-I; Dowman *et al.* (2011), Michalis e Dowman (2010), Rodrigues *et al.* (2013) e Rodrigues *et al.* (2015a) em cenas PRISM-ALOS e; Rodrigues e Ferreira (2013), Machado *et al.* (2013), Rodrigues *et al.*, (2015b) utilizando cenas HRC-CBERS 2B.

2.6 CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA EM ÓRBITA DE SENSORES DE VARREDURA LINEAR ORBITAIS

Ao utilizar a modelagem rigorosa, para uma correta extração de informações geodésicas, bidimensionais ou tridimensionais, a partir de imagens obtidas por sensores aéreos ou orbitais, é imprescindível que a reconstrução dos feixes de raios seja modelada o mais próximo da realidade possível. Isto inclui a acurada estimativa dos POE e dos POI.

Conforme apresentado no item 2.5.1, usualmente para sensores orbitais, os POI são estimados a partir de processos de calibração em laboratório, antes do lançamento dos satélites. No entanto, as condições físicas neste caso não são as mesmas encontradas quando os satélites são lançados e posteriormente quando os mesmos encontram-se em órbita. Segundo Batlsavias *et al.* (2006), durante o lançamento do satélite as condições ambientais se alteram de forma rápida e drástica, causando mudanças na geometria interna do sensor. Segundo os mesmos autores, mudanças geométricas não tão cruciais como as do caso anterior, mas ainda prejudiciais, também podem ocorrer devido às condições ambientais duras impostas ao satélite, após a estabilização do mesmo em órbita.

Ainda de acordo com Jacobsen (2005), as acelerações impostas durante o lançamento do satélite podem causar mudanças nas posições exatas das matrizes de CCD, o afastamento da linearidade geométrica (flexões) das mesmas e alterar as condições iniciais do sistema de lentes. O autor indica ainda, que a influência termal do sol quando o satélite encontra-se em órbita pode também causar mudanças geométricas. Como consequência, os POI devem ser reestimados após o lançamento do satélite preferencialmente de forma periódica.

Diante do problema apresentado, a calibração geométrica em órbita apresenta-se como uma solução. Uma vez que propõe a reestimativa dos POI do sensor em órbita, ao mesmo tempo em que se realiza a orientação da (s) imagem (ns), com estimativa ou refinamento dos POE. Trata-se, portanto de um ajustamento por feixes de raios perspectivos com parâmetros adicionais nas equações de colinearidade, referentes aos POI a serem reestimados. Nos casos de duas ou mais imagens convergentes, tem-se a possibilidade de se realizar a fototriangulação com

parâmetros adicionais (PA). Uma vez que as coordenadas do SRC com os PA são dadas por:

$$x_c = x_s + dx + a_0 - x_0 + dx_\theta + dx_r + dx_f + dx_\delta , \quad (49)$$

$$y_c = y_s + dy + b_0 - y_0 + dy_\theta + dy_{ps} + dy_r + dy_{sy} + dy_f , \quad (50)$$

então, as equações de colinearidade (36) e (37) ou (40) e (41) com os PA são:

$$x_s = -f \frac{\Delta X}{\Delta Z} - dx - a_0 + x_0 - dx_\theta - dx_r - dx_f - dx_\delta , \quad (51)$$

$$y_s = -f \frac{\Delta Y}{\Delta Z} - dy - b_0 + y_0 - dy_\theta - dy_{ps} - dy_r - dy_{sy} - dy_f , \quad (52)$$

sendo ΔX a parte do numerador das equações de colinearidade na Equação (36) ou (40); ΔY a parte do numerador das equações de colinearidade na Equação (37) ou (41) e; ΔZ a parte do denominador das equações de colinearidade nas Equações (36) e (37) ou (40) e (41).

Na calibração geométrica em órbita uma questão a ser analisada é a significância dos POI, ou seja, a investigação de qual é o conjunto de POI mais adequado para o sensor a ser calibrado geometricamente. Diferentes abordagens podem ser consideradas e dentre elas podem-se citar como exemplos: a comparação da ordem de grandeza do valor do POI e do seu desvio padrão, análise de componentes principais e análise por testes estatísticos como o teste *t* de *student* e o teste *F* de *Fisher* (KOCAMAN, 2007; GALO *et al.*, 2008). É importante citar que a verificação da exatidão da calibração utilizando dados externos, como pontos de verificação, deve ser feita após os testes de significância. A finalidade é analisar se a retirada de algum POI ou não resulta em melhora ou piora da exatidão planimétrica ou planialtimétrica.

Outra análise a ser efetuada é a de correlações entre parâmetros. A ocorrência de fortes correlações (maiores que 75%) entre os POI e os POE indica uma forte dependência entre os parâmetros. Desta forma, isto deve ser investigado uma vez que pode causar imprecisões na estimativa do POI, já que o valor do mesmo pode ter tido influência de algum POE. Como consequência, se os POI fortemente correlacionados com os POE forem utilizados na reconstrução do espaço objeto de outra(s) imagem(ns), proveniente (s) do mesmo sensor, não existirá

garantia de que os mesmos funcionem corretamente. Outra questão é a correlação entre os próprios POI. Caso haja algum par de POI fortemente correlacionados, o efeito de um pode ser em grande parte modelado pelo outro. Neste caso, desde que se obtenha melhores resultados de exatidão, um deles deve ser fixado no ajustamento de observações com o valor igual à zero ou com valor conhecido a priori. Um exemplo já citado é a forte correlação entre os parâmetros s_x , p_x e s_y , p_y , e entre Δf e s_x , s_y e p_x , p_y . É importante citar que caso haja ocorrências de fortes correlações entre os POI e entre os POI e os POE, o significado físico dos POI fortemente correlacionados poderá ser perdido.

A estimativa dos POI em órbita objetiva a extração de coordenadas bidimensionais ou tridimensionais a partir das coordenadas de imagens com maior exatidão. Kocaman (2007) indica que o processo de calibração geométrica em órbita tem sido alvo de considerável interesse na comunidade de Sensoriamento Remoto, e que este processo deve ser realizado com o objetivo de atender os requisitos de precisão para o georreferenciamento de imagens. Segundo Jacobsen (2004), apenas com a calibração em órbita é possível obter-se resultados ao nível sub-pixel na orientação de imagens SPOT, IKONOS, QUICKBIRD e outras imagens obtidas por plataformas orbitais. Especificamente para imagens PRISM – ALOS, Tadono *et al.*, (2009) indica que a calibração é importante na geração de um MDS acurado.

Exemplos de calibrações geométricas em órbita podem ser vistos em Jacobsen (1997) para o sensor IRS-1C PAN, Kornus *et al.* (1998) para o sensor MOMS-2P, Mulawa (2003) para os sensores do satélite Orbview-3, Tadono *et al.* (2004) para o sensor PRISM-ALOS, Gachet (2004) para o sensor HRG e HRS - SPOT 5, Poli (2005) para os sensores MOMS-2P, HRS - SPOT 5, ASTER e MISR - TERRA, e EROS-AI, Baltsavias *et al.* (2006) com sensores do satélite IKONOS-2, Toutin *et al.* (2006) com sensores HRS e HRG - SPOT 5 e RSI - FORMOSAT-2, Gruen *et al.* (2007) e Kocaman (2007) com o sensor PRISM-ALOS, Radhadevi e Solanki (2008) com sensores do satélite IRS P6, Zhang e Zheng (2012) e Rodrigues *et al.*, (2015b) com o sensor HRC - CBERS 2B e Wang *et al.* (2014) com o sensor pancromático do satélite ZY1-02C e com o sensor do satélite ZY-3. Cabe ressaltar que em todos os trabalhos citados as calibrações foram realizadas com imagens singulares ou estéreo imagens convergentes obtidas na mesma órbita (*along track*).

2.6.1 Calibração em serviço do sensor PRISM – ALOS

Diversas pesquisas relacionadas à calibração geométrica em órbita do sensor PRISM foram desenvolvidas ao longo de todo o tempo de operação do satélite ALOS. Três principais instituições apresentaram a maioria das pesquisas relacionadas: a JAXA, a CPRS (*Chair of Photogrammetry and Remote Sensing*), pertencente ao Instituto de Geodésia e Fotogrametria da ETH (*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*) e o CRCSI (*Cooperative Research Centre for Spatial Information*).

Os primeiros trabalhos desenvolvidos foram por parte da JAXA, dentre os quais se podem citar Tadono *et al.*, (2004), o qual apresenta os resultados da calibração em laboratório, e, Tadono *et al.*, (2006) que analisa os primeiros processos de calibração geométrica em órbita e validação de imagens PRISM e de MDS provenientes destas. Posteriormente vários outros trabalhos foram desenvolvidos como Tadono *et al.*, (2007a), Tadono *et al.*, (2007b). A partir destes e de outros trabalhos relacionados, foram disponibilizados aos principais pesquisadores do Programa de Ciências ALOS alguns dados iniciais. Tais dados continham os valores dos deslocamentos bidirecionais das matrizes de CCD em relação ao PP e as distâncias focais, todos obtidos por calibração geométrica em órbita, os quais foram atualizados posteriormente em junho de 2007 (TADONO *et al.*, 2008). Nos anos seguintes, trabalhos de investigação de possíveis atualizações foram realizados, como exemplo pode-se citar Tadono *et al.*, (2010).

Por parte da CPRS – ETH, dentre alguns trabalhos desenvolvidos pode-se citar: Kocaman (2007), Kocaman e Gruen (2007a), Kocaman e Gruen (2007b), Gruen *et al.*, (2007) e Kocaman e Gruen (2008). Nas pesquisas citadas, os autores analisaram calibrações geométricas em órbita utilizando um conjunto específico de 10 parâmetros para cada câmera, a saber: um efeito de escala único na direção y_s e um único ângulo central δ de flexão para as quatro matrizes de CCD utilizadas no imageamento, e os oito POI dx e dy referentes aos deslocamentos bidimensionais dos centros das matrizes de CCD em relação ao PP no plano focal. No total foram utilizados 30 parâmetros.

As pesquisas desenvolvidas no âmbito do CRCSI foram realizadas por pesquisadores do Departamento de Geomática da Universidade de Melbourne. Como exemplos pode-se citar: Weser *et al.*, (2008a); Weser *et al.*, (2008b) e; Rottensteiner *et al.*, (2009). Todas as pesquisas foram baseadas na utilização de um modelo polinomial com 8 parâmetros, relacionados com as correções de aberração de velocidade e refração atmosférica para cada câmera, componentes bidimensionais do deslocamento das quatro matrizes de CCD utilizadas no imageamento em relação ao PP no plano focal, alteração do tamanho do pixel nas matrizes de CCD, deslocamento sistemático do eixo y_s nas matrizes de CCD, variações não lineares do tamanho do pixel nas matrizes de CCD ao longo do eixo y_s e afastamento de linearidade geométrica das matrizes de CCD. Uma vez que para cada câmera foram definidos 26 parâmetros, no conjunto total foram utilizados 78 parâmetros. Para a calibração geométrica em órbita os dados de calibração de 2006 e de 2007 da JAXA foram utilizados como ponto de partida no ajustamento por feixes. Os dados de 2007 adaptados podem ser vistos no aplicativo BARISTA, desenvolvido pelo projeto 2.1 do CRCSI.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e a metodologia aplicada para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram:

- Um conjunto de nove imagens PRISM – ALOS, integrantes de três tripletos, cedidas pelo Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, campus de Presidente Prudente, com as seguintes características:
 - Data das imagens: 20/11/2008;
 - Nível de processamento: 1B1 (somente calibração radiométrica aplicada);
 - STR das efemérides: ITRF 97 época 1997,0;
- Um conjunto de quarenta e seis ortofotos com 1 m de resolução espacial e quarenta e seis MDT de 5 m de resolução espacial, todos referenciados ao SRT SIRGAS 2000, época 2000,4 e cedidos pela empresa Topocart para extração de coordenadas dos pontos de controle e verificação;
- Aplicativo BARISTA versão de teste;
- Aplicativo MATLAB R2007a;

3.2 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Para alcançar o objetivo proposto nesta pesquisa, algumas etapas foram planejadas. Primeiramente, definiu-se a área de estudo, a qual é representada pelos tripletos PRISM. Com base na área de estudo, houve o planejamento da distribuição dos pontos de controle, de verificação e fotogramétricos. Em seguida, as coordenadas planimétricas e altimétricas dos pontos de controle e verificação no espaço imagem foram extraídas respectivamente das ortofotos e dos MDT. Logo após, partiu-se para a etapa de preparação de dados necessários para as fototriangulações dos tripletos, como por exemplo, a obtenção dos vetores de estado do satélite para compor parte dos POE e a obtenção das coordenadas do SRM de todos os pontos de controle, de verificação e fotogramétricos para cada matriz de CCD de cada imagem.

Na etapa da modelagem matemática foram inseridos matematicamente os parâmetros responsáveis pela adaptação do modelo UCL para o uso de coordenadas referenciadas a um SRT e a aceleração da atração gravitacional terrestre devido ao seu achatamento polar na aceleração do modelo UCL adaptado. Em seguida foram realizados os experimentos de fototriangulação com estimativa dos POI em órbita separadamente para dois tripletos. Com os resultados obtidos, foram feitas análises de significância dos POI e de correlação entre os mesmos com o objetivo de encontrar um conjunto de POI ótimo para compor o modelo matemático funcional e que propiciem melhor exatidão na extração de coordenadas tridimensionais do espaço objeto a partir de pontos nas imagens. Também foram analisadas as correlações entre os POI para verificar a possível perda de significado físico e; entre os POI e os POE, com o objetivo de analisar possíveis influências dos POE nas estimativas dos POI.

Após cada um dos ajustamentos foram analisadas as precisões dos mesmos e a verificação da exatidão das coordenadas geodésicas extraídas a partir das fototriangulações sem e com estimativa dos POI em órbita, utilizando pontos de verificação do espaço objeto. Nos itens a seguir cada uma das etapas será descrita com maiores detalhes.

3.3 ÁREA DE ESTUDO E AQUISIÇÃO DOS PONTOS

A área coberta pelo conjunto de imagens abrange o município de Presidente Prudente – SP e regiões adjacentes. Cada cena cobre uma área de aproximadamente 35 km por 35 km na superfície terrestre. A Figura 19-a apresenta a localização e os limites dos tripletos utilizados nesta pesquisa, os quais foram denominados de 1, 2 e 3. Na Figura 19-b, apresenta-se a localização dos tripletos dentro do estado de São Paulo.

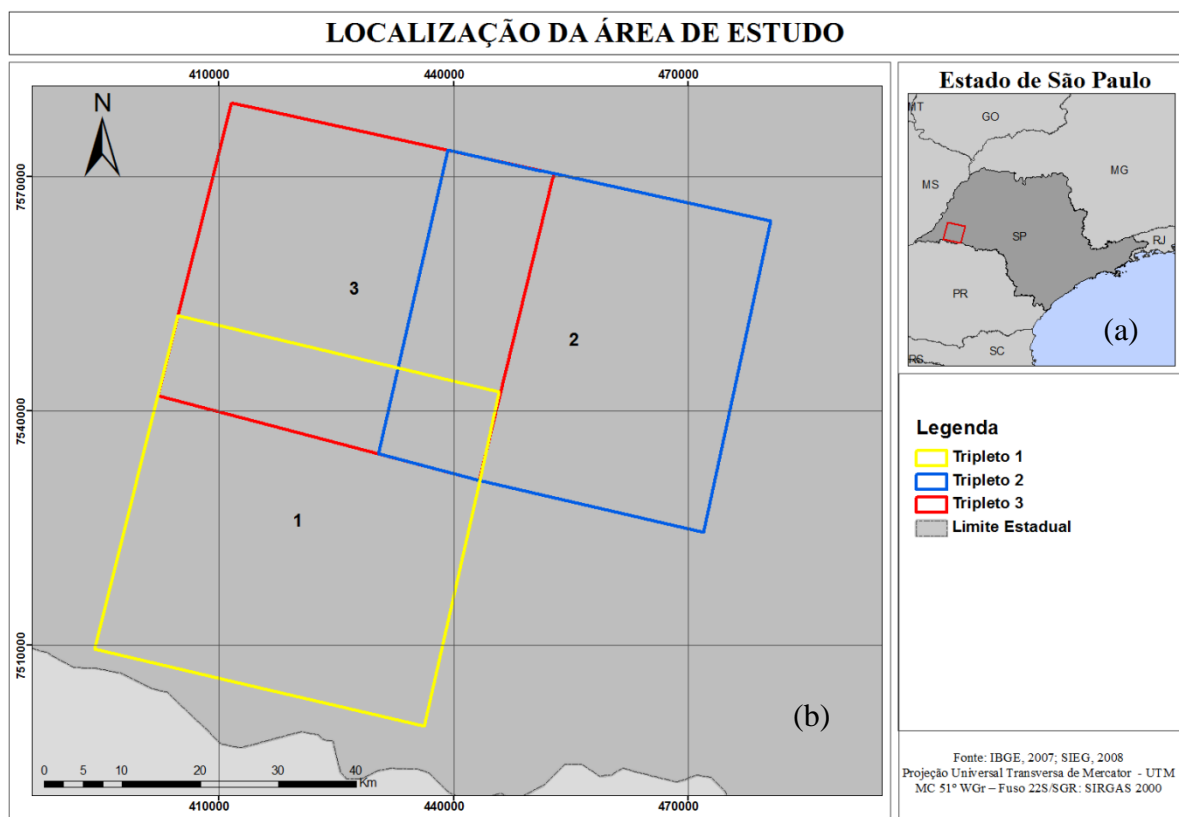


FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (a) E LIMITE DAS ÁREAS IMAGEADAS PELOS TRIPLETOS (b).

FONTE: O AUTOR (2015).

Para a realização dos experimentos, um conjunto de pontos de controle é necessário. Com a finalidade de se obter uma maior rigidez nos processos de fototriangulação, em cada tripleto foram coletados quarenta pontos fotogramétricos distribuídos homogeneamente. Como exemplo, apresenta-se na Figura 20 a

distribuição no tripleto 1. Outra questão é que todos os pontos fotogramétricos foram coletados nas três imagens de cada tripleto, ou seja, todos dispõem de três raios.

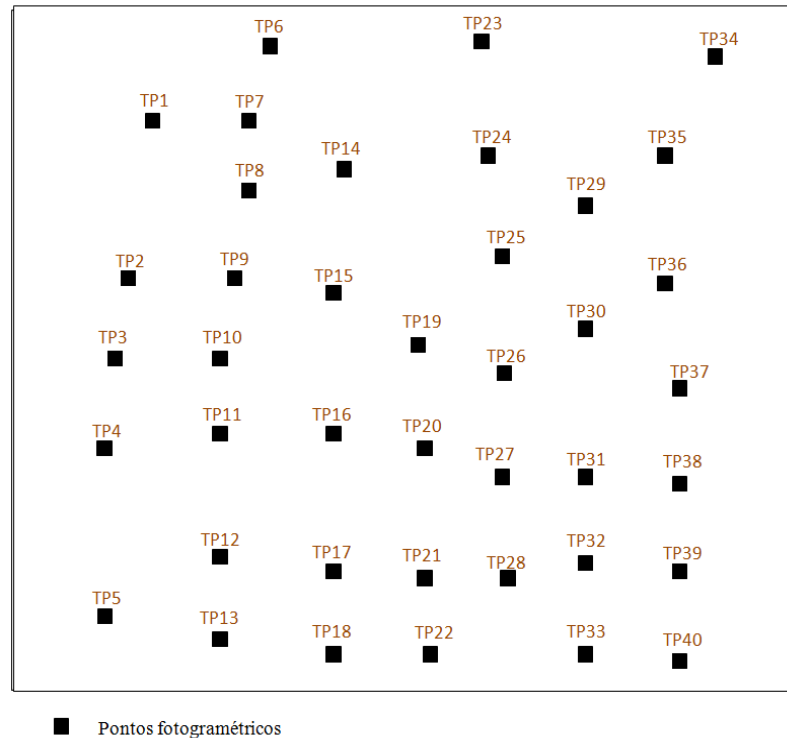


FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NO TRIPLETO 1.

FONTE: O AUTOR (2015).

Para a extração das coordenadas tanto dos pontos de controle como de verificação, ortoimagens com 1 m de GSD foram obtidas junto à empresa Topocart, bem como MDT em formato *raster* com 5 m de GSD referentes às mesmas áreas das ortofotos. Uma vez que a quantidade de ortofotos e MDT disponibilizados foi pequena, a quantidade de pontos de controle e verificação também foi reduzida.

Para contornar em parte este problema, na maioria das vezes em uma única ortofoto/MDT foi extraído mais de um ponto de controle ou verificação o mais separado possível. Tal procedimento permitiu o aumento do número de equações no sistema e do número de graus de liberdade. Outro motivo pelo qual ocorreu a coleta de mais de um ponto de controle por ortofoto, foi o de evitar a orientação de uma matriz de CCD com apenas um ponto, o que viria a ocorrer algumas vezes se apenas um ponto de controle fosse coletado. Desta forma então, no tripleto 1 foram coletados 20 pontos de controle e 22 pontos de verificação; no tripleto 2 foram coletados 22 pontos de controle e 20 de verificação e; no tripleto 3 foram coletados

22 pontos de controle e 20 pontos de verificação. A Figura 21 apresenta a distribuição dos pontos de controle e de verificação nos dois tripletos.

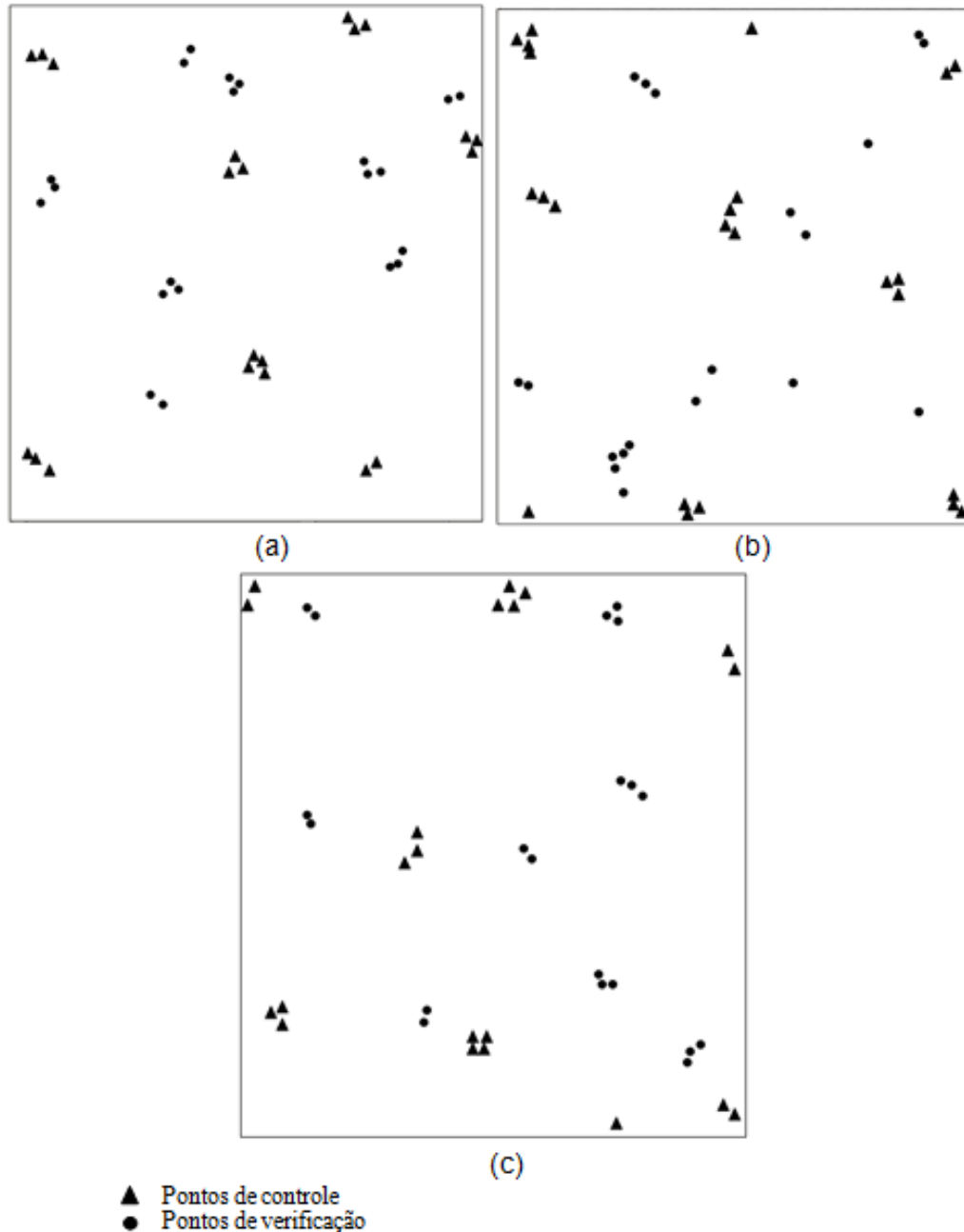


FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E VERIFICAÇÃO NOS TRIPLETOS 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

FONTE: O AUTOR (2015).

Com o objetivo de facilitar a medida pontual de pontos de controle e verificação, tanto no espaço imagem quanto no objeto, foi empregada a determinação de centroides de entidades geométricas. Desta forma, ao invés de se

medir apenas um ponto, mediu-se de 3 a 4 pontos em vértices de feições geométricas nas imagens, como edificações, campos de futebol, quadras, ou estruturas antrópicas de outras naturezas com vértices bem identificáveis nas imagens. A partir da média aritmética das coordenadas bidimensionais do espaço imagem e objeto dos vértices citados, obtiveram-se as coordenadas dos centroides. Dois exemplos são apresentados a seguir. Na Figura 22-a as coordenadas do ponto 16 no espaço imagem foram calculadas a partir das coordenadas dos pontos 16_1, 16_2, 16_3 e 16_4 na imagem. Já na Figura 22-b apresenta-se o ponto 16 no espaço objeto, com coordenadas calculadas a partir das coordenadas dos pontos 16_1, 16_2, 16_3 e 16_4 obtidas na ortofoto. Nas Figuras 22-c e 22-d são exemplificadas as obtenções das coordenadas do ponto 20 no espaço imagem e objeto, respectivamente, a partir das coordenadas dos pontos 20_1, 20_2 e 20_3. A partir da estimativa das coordenadas planimétricas dos pontos centroides, os mesmo foram projetados nos MDT para a extração das coordenadas altimétricas.

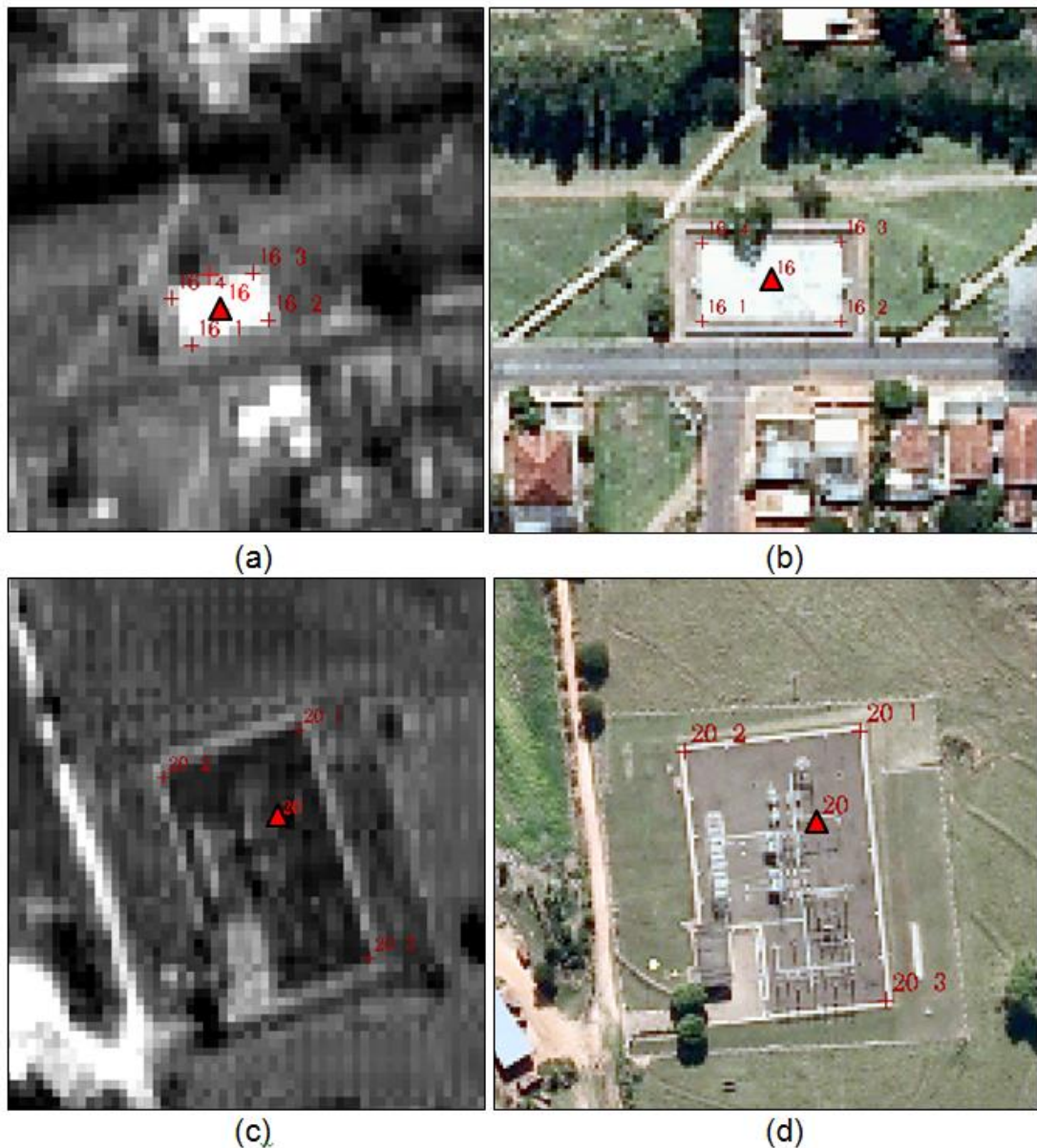


FIGURA 22 – EXEMPLOS DE COORDENADAS DE PONTOS CENTROIDES.

FONTE: O AUTOR (2015).

Uma questão importante é que no produto PRISM com nível de processamento 1B1 são disponibilizadas separadamente as imagens provenientes de cada uma das matrizes de CCD, ao invés da imagem fusionada com 14496 colunas. Desta forma, as coordenadas L e C dos pontos de controle, de verificação e fotogramétricos foram coletados nos SRI particulares de cada imagem de cada matriz de CCD. Na Figura 23 é apresentado como exemplo as imagens derivadas das matrizes de CCD da câmera ré do triplete 1, com os *dummies* esquerdo e direito. É importante ressaltar que a sobreposição entre as matrizes de CCD é de 32 pixels.

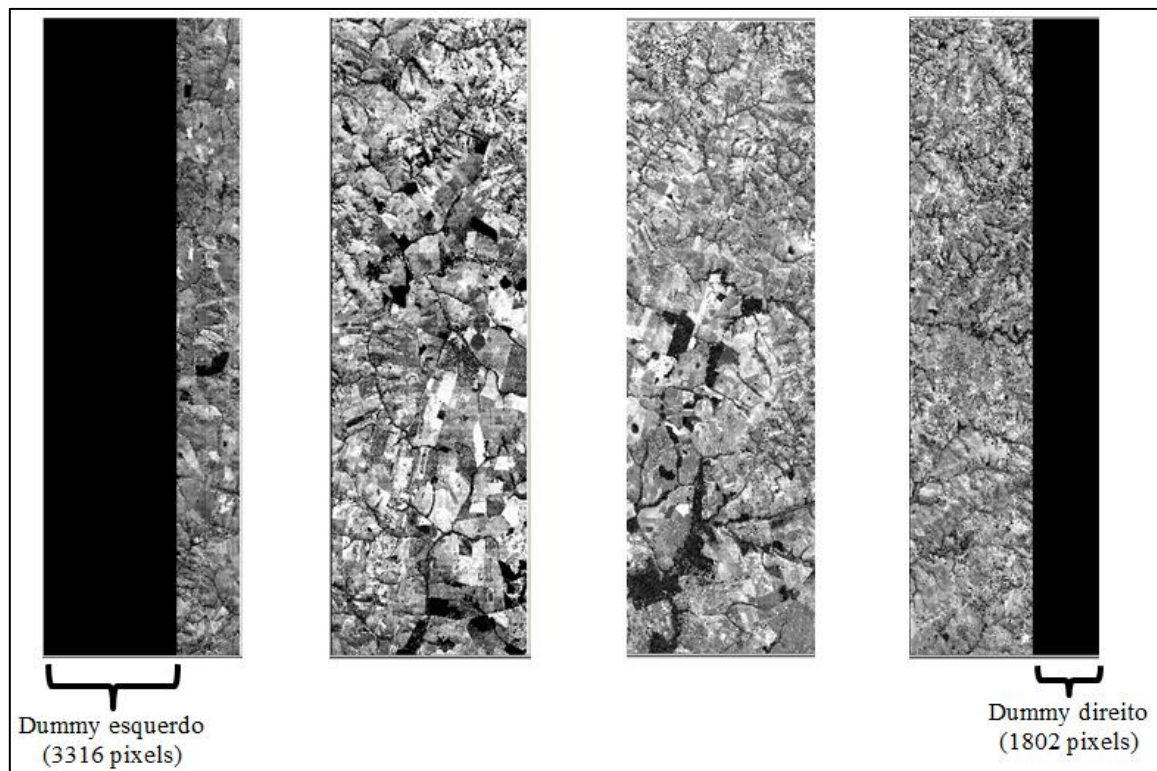


FIGURA 23 - IMAGENS DERIVADAS DAS MATRIZES DE CCD DA CÂMERA RÉ DO TRIPLETO 1, COM OS *DUMMIES*.

FONTE: O AUTOR (2015).

No espaço imagem, uma vez obtidas as coordenadas L e C do SRI das imagens das matrizes de CCD, as mesmas foram transformadas para coordenadas x_s e y_s do SRM. Para tanto, foram utilizadas as Equações (1) e (2) (item 2.2.1) e os valores de tamanho do pixel nas matrizes de CCD (PS) apresentados na Tabela 2 para as câmeras ré, nadir e vante.

3.4 EXTRAÇÃO DOS VETORES DE ESTADO DO SATÉLITE ALOS

Após as obtenções das coordenadas do espaço imagem, partiu-se para a etapa de extração dos vetores de estado referentes ao tempo de início da formação de todas as imagens dos três tripletos. Os dados de posição e velocidade do ALOS são provenientes do GPS embarcado no satélite. Estes dados estão disponibilizados nos arquivos .SUP, na parte auxiliar 8, referenciados tanto ao SRCG ICRF1 quanto ao SRT ITRF 97, de 1 em 1 minuto para o dia da obtenção da

imagem (JAXA, 2012). Uma vez que os modelos de plataforma foram adaptados ao uso de coordenadas referenciadas a um SRT, os vetores de estados foram extraídos no ITRF 97. A Figura 24 apresenta um exemplo de um trecho de arquivo SUP, na parte auxiliar 8, contendo vetores de estado referenciados ao ITRF 97, para duas épocas (23:00:00h e 23:01:00h UTC de 04/07/2008).

ALDSEF	ALOS	HCNT	****	20080708	07:35:39	170	1505
20080705	20080705	20020419	V01	ECR	ELMD		
ALDSEF	SC	ALOS		20080708		073149.000	
20080704	230000.000000	20080705	235900.000000	000060			
20080708072726-000000		001		00001500			
FIX	UTC	JAXA	GUTS	GPS	APPL	A	
3.986004415000000E+14			3.141592653589793E+00				
20080708	073149.000						
20060101	033						
20080704	230000.000000	-3.812012178809961E+03					
1.406762922673285E+03		-5.798985245797491E+03					
6.323637771884549E+00		-3.489660535764257E-02	-				
4.168676763204365E+00							
20080704	230100.000000	-3.425230123826240E+03					
1.400170129156716E+03		-6.037229374555848E+03					
6.564552947293644E+00		-1.851341703575819E-01	-				
3.770150247938497E+00							

FIGURA 24 - TRECHO DE UM ARQUIVO SUP COM DADOS DE POSIÇÃO EM QUILOMETROS E VELOCIDADE EM QUILOMETROS POR SEGUNDO DO SATÉLITE ALOS PARA DUAS ÉPOCAS.
FONTE: O AUTOR (2015).

Do conjunto de dados foram extraídos os vetores de estado de cinco instantes antes e depois do tempo de início da formação das imagens, sendo estes últimos retirados dos arquivos “*workreport*”. Uma interpolação utilizando o interpolador *spline* cúbico foi realizada para estimar o vetor de estado referente ao instante da aquisição da primeira linha de cada uma das imagens. Posteriormente, houve a transformação de SRT das componentes do vetor de estado de ITRF 97 época 1997,0 para ITRF 2000 e em seguida de ITRF 2000 para SIRGAS 2000 época 2000,4. Para a primeira transformação utilizou-se a Transformação Generalizada de Helmert (14 parâmetros) com os parâmetros divulgados pelo IERS, e, na segunda transformação utilizou-se a Transformação de Helmert (7 parâmetros) com os parâmetros divulgados em IBGE (2015). As componentes da velocidade das estações foram extraídas do aplicativo VEMOS 2009 referenciadas ao ITRF 2005 e em seguida transformadas para o ITRF 97. Um exemplo de vetores de estado iniciais para as imagens do tripleto 1 é apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 – EXEMPLO DE VETORES DE ESTADO INICIAIS DAS IMAGENS DO TRIPLETO 1.

Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
$X_0 = 3934478,832 \text{ m}$	$X_0 = 4077679,264 \text{ m}$	$X_0 = 4211513,015 \text{ m}$
$Y_0 = -5077466,133 \text{ m}$	$Y_0 = -5137730,296 \text{ m}$	$Y_0 = -5184833,045 \text{ m}$
$Z_0 = -2974495,213 \text{ m}$	$Z_0 = -2660907,772 \text{ m}$	$Z_0 = -2341014,156 \text{ m}$
$u_x = -3203,807 \text{ m/s}$	$u_x = -3005,886 \text{ m/s}$	$u_x = -2798,869 \text{ m/s}$
$u_y = 1449,028 \text{ m/s}$	$u_y = 1164,596 \text{ m/s}$	$u_y = 878,723 \text{ m/s}$
$u_z = -6726,268 \text{ m/s}$	$u_z = -6872,732 \text{ m/s}$	$u_z = -7002,750 \text{ m/s}$

FONTE: O AUTOR (2015)

Os valores das componentes da posição (X_0 , Y_0 , Z_0) apresentam incertezas (X_T , Y_T , Z_T), assim como as componentes da velocidade (u_x , u_y , u_z) também possuem suas incertezas (u_{xT} , u_{yT} , u_{zT}). Nesta pesquisa, estas incertezas foram estimadas como incógnitas nos ajustamentos.

Os dados de atitude do satélite ALOS são provenientes do giroscópio em conjunto com o sensor de estrelas que eram embarcados no mesmo. Quando estes dados estão disponíveis encontram-se nos arquivos .SUP, na parte auxiliar 12, em forma de *quaternions*, referenciados ao SRCG ICRF1. Para as imagens utilizadas nesta pesquisa, os dados de atitude não estavam disponíveis. Segundo Kocaman (2007) estes dados podem não estar disponíveis para algumas imagens. Tendo em vista tal questão, o modelo rigoroso do tipo Posição-Rotação foi utilizado. Neste caso, foram considerados como incógnitas nos ajustamentos os ângulos de atitude sem sentido físico (ω , φ e κ_0), para alinhar o SRC com o SRT SIRGAS 2000.

3.5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE PLATAFORMA

Originalmente, o modelo UCL foi desenvolvido para ser utilizado com coordenadas referenciadas a um SRCG. Isso tendo em vista que a aceleração é calculada pelo Problema dos Dois Corpos. Tal configuração exige que as coordenadas de pontos de controle e de verificação estejam também referenciadas a um SRCG. Isso implica em mais uma atividade a ser realizada, uma vez que normalmente as coordenadas dos pontos no espaço objeto são coletadas em um SRT. Porém, conforme apresentado no item 2.4.1, desde que o intervalo de tempo

de propagação de órbita seja curto o suficiente para desprezar os efeitos da Precessão, da Nutação e do Movimento do Polo, somente o efeito da velocidade angular de rotação da Terra pode ser adicionado no Problema dos Dois Corpos para adaptá-lo ao uso de coordenadas referenciadas a um SRT. Uma vez que o intervalo de tempo de formação das imagens PRISM com 16000 linhas é de aproximadamente seis segundos, a metodologia citada pode ser utilizada para a adaptação do modelo UCL. Desta forma, as componentes da aceleração no Problema dos Dois Corpos adaptado ao uso de coordenadas referenciadas a um SRT são dadas por (LEICK, 2004):

$$\begin{aligned}\ddot{X} &= -\frac{GM}{r^3}X + \omega_t^2 X + 2\omega_t^2 u_y , \\ \ddot{Y} &= -\frac{GM}{r^3}Y + \omega_t^2 Y + 2\omega_t^2 u_x , \\ \ddot{Z} &= -\frac{GM}{r^3}Z ,\end{aligned}\tag{53}$$

onde ω_t é o módulo da velocidade angular de rotação da Terra e; $X, Y, Z, u_x, u_y, \ddot{X}, \ddot{Y}$, e \ddot{Z} são respectivamente as componentes da posição, velocidade e aceleração em um SRT. Ao adicionarem-se estas componentes na parte da posição do satélite no modelo de plataforma UCL tem-se:

$$\begin{aligned}X_s &= X_0 + u_x t + \frac{1}{2} \left[-\frac{GM \cdot X_0}{r^3} + \omega_t^2 X_0 + 2\omega_t u_y \right] \cdot t^2 , \\ Y_s &= Y_0 + u_y t + \frac{1}{2} \left[-\frac{GM \cdot Y_0}{r^3} + \omega_t^2 Y_0 + 2\omega_t u_x \right] \cdot t^2 , \\ Z_s &= Z_0 + u_z t - \frac{GM \cdot Z_0}{2 \cdot r^3} \cdot t^2 ,\end{aligned}\tag{54}$$

sendo:

$$r = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} .\tag{55}$$

Outra característica original do modelo UCL é que as acelerações são calculadas levando em consideração a atração gravitacional de uma Terra esférica com distribuição homogênea de massa (Problema dos Dois Corpos). Porém,

considerando o tempo total de aquisição da imagem PRISM (~6s), a influência de certas perturbações orbitais podem se apresentar. Conforme mencionado anteriormente no item 2.4.1, a perturbação dominante em satélites de órbitas próximas da Terra é devido ao achatamento da mesma. Desta forma, nesta pesquisa foi proposta a consideração apenas desta perturbação no modelo UCL. As componentes da aceleração já adaptadas ao uso de coordenadas referenciadas a um SRT, levando em conta apenas a atração gravitacional terrestre devido ao seu achatamento polar são dadas por:

$$\begin{aligned}\ddot{X} &= -\frac{GM}{r^3}X - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}X \left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right) + \omega_t^2 X + 2\omega_t^2 u_y, \\ \ddot{Y} &= -\frac{GM}{r^3}Y - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}Y \left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right) + \omega_t^2 Y + 2\omega_t^2 u_x, \\ \ddot{Z} &= -\frac{GM}{r^3}Z - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}Z \left(1 - 5\frac{Z^2}{r^2}\right).\end{aligned}\tag{56}$$

Ao inserirem-se estas componentes na parte da posição do satélite no modelo de plataforma UCL tem-se:

$$\begin{aligned}X_s &= X_0 + u_x t + \frac{1}{2} \left[-\frac{GM}{r^3}X_0 - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}X_0 \left(1 - 5\frac{Z_0^2}{r^2}\right) + \omega_t^2 X_0 + 2\omega_t^2 u_y \right] \cdot t^2, \\ Y_s &= Y_0 + u_y t + \frac{1}{2} \left[-\frac{GM}{r^3}Y_0 - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}Y_0 \left(1 - 5\frac{Z_0^2}{r^2}\right) + \omega_t^2 Y_0 + 2\omega_t^2 u_x \right] \cdot t^2, \\ Z_s &= Z_0 + u_z t + \left[-\frac{GM}{r^3}Z_0 - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2}{r^5}Z_0 \left(1 - 5\frac{Z_0^2}{r^2}\right) \right] \cdot t^2.\end{aligned}\tag{57}$$

Para efeitos desta pesquisa, este modelo de plataforma foi denominado de modelo J2.

3.6 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

Uma vez dispondo-se das coordenadas dos pontos de controle, verificação e fotogramétricos no SRM, dos pontos de controle no SRT SIRGAS 2000 e; dos vetores de estado iniciais das imagens dos três tripletos, a próxima etapa foi o desenvolvimento da modelagem matemática das fototriangulações.

Nesta pesquisa foi utilizado um conjunto diferente de POI em relação ao utilizado nos trabalhos de pesquisa mencionados no item 2.6.1. Os POI considerados nas câmeras ré, nadir e vante foram: as distâncias focais f ; as translações dx e dy dos centros geométricos das matrizes de CCD para o PP nos planos focais; os parâmetros corretivos a_0 e b_0 referentes às alterações sistemáticas de dx e dy ; as coordenadas dos PP x_0 e y_0 ; as rotações θ das matrizes de CCD; os coeficientes K_1 e K_2 das equações de distorção radial simétrica dos sistemas de lentes; os parâmetros Δf referentes às alterações dos valores de f ; os ângulos centrais δ das flexões das matrizes de CCD e; os fatores de escala p_y das mudanças das dimensões dos pixels na direção de y_s . O coeficiente da variação de escala do sistema óptico s_y não foi considerado devido sua forte correlação com o parâmetro Δf . Os parâmetros p_y foram considerados diferentes para cada matriz de CCD com o objetivo de se aproximar mais da realidade física e evitar fortes correlações com Δf , diferentemente do considerado em Kocaman (2007). Outro parâmetro também considerado único para cada matriz de CCD foi o ângulo central δ das flexões das matrizes de CCD, também diferentemente do realizado em Kocaman (2007). Uma vez que os termos corretivos das rotações em y_s e das mudanças das dimensões dos pixels na direção de y_s são funções da própria coordenada y_s , os mesmos foram agrupados em um único termo corretivo com um único POI. Tem-se então:

$$dy_\theta + dy_{ps} = y_s(1 - \cos \theta) - y_s \cdot \frac{p_y}{p_s} = y_s \left(1 - \cos \theta - \frac{p_y}{p_s}\right), \quad (58)$$

$$dy_\theta + dy_{ps} = a_1 y_s, \quad (59)$$

onde:

$$a_1 = \left(1 - \cos \theta - \frac{p_y}{p_s}\right). \quad (60)$$

Para compatibilizar o termo corretivo das rotações em x_s considerou-se:

$$dx_\theta = y_s \cdot \sin \theta = b_1 y_s. \quad (61)$$

Nos ajustamentos, os POI dx e dy , cujos valores foram apresentados na Tabela 2, foram considerados como constantes nos ajustamentos, uma vez que suas incertezas são estimadas a partir dos parâmetros a_0 e b_0 . Os parâmetros x_0 e y_0 também foram considerados como constantes, à medida que os efeitos causados pelos mesmos podem ser modelados pelos parâmetros a_0 e b_0 . Os valores utilizados das distâncias focais para as três câmeras foram os apresentados na Tabela 2, os quais também foram considerados como constantes nos ajustamentos tendo em vista que suas incertezas foram estimadas a partir dos parâmetros Δf . Os parâmetros a_1 e b_1 receberam injunções relativas de peso com incertezas de 0,0003. Os demais POI foram estimados sem injunções relativas. É importante ressaltar que os parâmetros a_0 , b_0 , a_1 e b_1 da segunda matriz de CCD da esquerda para a direita no plano focal foram considerados como constantes nos ajustamentos com o objetivo de evitar singularidades, conforme indicado por Weser *et al.*, (2008a) e Rottensteiner *et al.*, (2009).

Considerando as coordenadas do SRC com os POI tem-se:

$$x_c = x_s + dx + a_0 - x_0 + a_1 y_s + dx_r + dx_f + dx_\delta, \quad (62)$$

$$y_c = y_s + dy + b_0 - y_0 + b_1 y_s + dy_r + dy_f. \quad (63)$$

Conforme indicado no item 3.4, a modelagem rigorosa utilizada foi a do tipo Posição-Rotação. Neste caso, as equações de colinearidade com os POI são:

$$x_s = -f \frac{\Delta X}{\Delta Z} - dx - a_0 + x_0 - a_1 y_s - dx_r - dx_f - dx_\delta, \quad (64)$$

$$y_s = -\frac{f \Delta Y}{\Delta Z} - dy - b_0 + y_0 - b_1 y_s - dy_r - dy_f, \quad (65)$$

sendo ΔX a parte a parte do numerador das equações de colinearidade na Equação (40); ΔY a parte do numerador das equações de colinearidade na Equação (41) e; ΔZ a parte do denominador das equações de colinearidade nas Equações (40) e (41).

Nos modelos de plataforma UCL e J2 adaptados ao uso de um SRT, devem-se levar em consideração os parâmetros X_T , Y_T , Z_T , u_{xT} , u_{yT} e u_{zT} que representam as incertezas nas componentes das posições e velocidades, obtidas

por interpolação dos dados provenientes do GPS embarcado. Estes parâmetros receberam injunções relativas, com os pesos inversamente proporcionais às variâncias associadas. Os desvios-padrão utilizados para o cálculo das variâncias foram estimados empiricamente. Em uma etapa preliminar, realizaram-se as fototriangulações com valores de desvios-padrão para X_T , Y_T , Z_T , u_{xT} , u_{yT} e u_{zT} iguais a 1000 m e 100 m/s, analisando-se em seguida o quanto os parâmetros citados discrepavam dos seus valores aproximados iniciais dos ajustamentos (iguais à zero). Com os valores de discrepância conhecidos, os valores de desvios-padrão foram considerados iguais aos maiores valores das discrepâncias entre as componentes X_T , Y_T , Z_T e entre as componentes u_{xT} , u_{yT} e u_{zT} , arredondados para o maior inteiro múltiplo de dez. A Tabela 4 a seguir apresenta o valor dos desvios-padrão para os parâmetros X_T , Y_T , Z_T , u_{xT} , u_{yT} e u_{zT} nos três tripletos utilizados.

TABELA 4 – DESVIOS-PADRÃO DOS POE INJUNÇIONADOS NAS FOTOTRIANGULAÇÕES DOS TRIPLETOS.

Tripleto	Parâmetros	Desvios-padrão
1	X_T, Y_T, Z_T	100 m
	u_{xT}, u_{yT} e u_{zT}	100 m/s
2	X_T, Y_T, Z_T	70 m
	u_{xT}, u_{yT} e u_{zT}	100 m/s
3	X_T, Y_T, Z_T	90 m
	u_{xT}, u_{yT} e u_{zT}	100 m/s

FONTE: O AUTOR (2015)

As partes referentes à posição do satélite nos dois modelos de plataforma são:

- modelo UCL adaptado:

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + X_T + (u_x + u_{xT})t + \left[-\frac{GM \cdot (X_0 + X_T)}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 (X_0 + X_T) + 2\omega_t (u_y + u_{yT}) \right] t^2, \\
 Y_s &= Y_0 + Y_T + (u_y + u_{yT})t + \left[-\frac{GM \cdot (Y_0 + Y_T)}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 (Y_0 + Y_T) + 2\omega_t (u_x + u_{xT}) \right] t^2, \\
 Z_s &= Z_0 + Z_T + (u_z + u_{zT})t - \frac{GM \cdot (Z_0 + Z_T)}{2 \cdot r^3} t^2,
 \end{aligned} \tag{66}$$

- modelo J2 adaptado:

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + X_T + (u_x + u_{xT})t + \left[-\frac{GM(X_0 + X_T)}{r^3} - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2(X_0 + X_T)}{r^5} \left(1 - 5\frac{(Z_0 + Z_T)^2}{r^2}\right) + \right. \\
 &\quad \left. \omega_t^2(X_0 + X_T) + 2\omega_t(u_y + u_{yT}) \right] t^2, \\
 Y_s &= Y_0 + Y_T + (u_y + u_{yT})t + \left[-\frac{GM(Y_0 + Y_T)}{r^3} - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2(Y_0 + Y_T)}{r^5} \left(1 - 5\frac{(Z_0 + Z_T)^2}{r^2}\right) + \right. \\
 &\quad \left. \omega_t^2(Y_0 + Y_T) + 2\omega_t(u_x + u_{xT}) \right] t^2, \tag{67}
 \end{aligned}$$

$$Z_s = Z_0 + Z_T + (u_z + u_{zT})t + \left[-\frac{GM(Z_0 + Z_T)}{r^3} - \frac{3}{2}J_2 \frac{GMa_e^2(Z_0 + Z_T)}{r^5} \left(1 - 5\frac{(Z_0 + Z_T)^2}{r^2}\right) \right] t^2,$$

sendo:

$$r = \sqrt{(X_0 + X_T)^2 + (Y_0 + Y_T)^2 + (Z_0 + Z_T)^2}. \tag{68}$$

Uma vez que os vetores de estado estão referenciados ao ITRF 97, os valores das constantes são: $a_e = 6378137$ m, $\omega_t = 7292115 \times 10^{-11}$ rad/s e $J_2 = 1,08263 \times 10^{-3}$. Porém, para a constante gravitacional GM , adotou-se o valor $3,986004415000000 \times 10^{14}$ m³s⁻² divulgado nos arquivos SUP, na parte auxiliar 8, juntamente com os valores dos vetores de estado referenciados ao SRT ITRF 97, conforme visto na Figura 24.

Com relação à orientação do sensor, os ângulos ω e φ foram considerados sem variações durante o tempo de formação das cenas, uma vez que estas são formadas em um curto intervalo de tempo (~6s). Por outro lado, o ângulo κ foi considerado com variações devido ao movimento lateral do satélite (*crab movement*) de acordo com o argumento da latitude da órbita, para compensar o movimento de rotação da Terra (SATORO; AKIHIRO, 2011). Desta forma, a parte da orientação do satélite nos dois modelos de plataforma foi definida por:

$$\begin{aligned}
 \omega &= \omega_0, \\
 \varphi &= \varphi_0, \\
 \kappa &= \kappa_0 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2. \tag{69}
 \end{aligned}$$

Nesta pesquisa, dois conjuntos de experimentos foram definidos. O primeiro utilizando o modelo de plataforma UCL adaptado e o segundo utilizando o modelo de plataforma J2 adaptado. Dentro de cada conjunto, cinco experimentos foram realizados. No primeiro experimento foi efetuada a fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem a estimativa dos POI em órbita. No segundo experimento, realizou-se a fototriangulação das imagens do tripleto 1 com a estimativa dos POI em órbita. Como as matrizes de CCD que formaram as imagens do tripleto 1 não foram as mesmas que formaram as imagens do tripleto 2, no terceiro e quarto experimento realizaram-se as fototriangulações das imagens do tripleto 2, sem e com a estimativa dos POI em órbita respectivamente. Tais experimentos tiveram a finalidade de realizar uma análise comparativa de resultados utilizando os dois conjuntos de matrizes de CCD. No quinto experimento os POI estimados com o tripleto 1 foram utilizados para realizar a orientação interior na fototriangulação das imagens do tripleto 3. Este último experimento objetivou analisar a possibilidade de uso dos POI estimados em uma fototriangulação em fototriangulações de outras imagens. Os experimentos foram enumerados de acordo com a sequência apresentada, de 1 a 10, com os cinco primeiros utilizando o modelo de plataforma UCL e os cinco últimos utilizando o modelo de plataforma J2.

Os POI estimados com o tripleto 2 não foram testados na fototriangulação das imagens do tripleto 3 porque conforme mencionado, as matrizes de CCD, que formaram as imagens do tripleto 2, não foram as mesmas que formaram as imagens do tripleto 1. Na formação das imagens do tripleto 1 e 3 tem-se nas câmeras ré/nadir as matrizes de CCD de 1 a 4, e na câmera vante as matrizes de 3 a 6. Já no tripleto 2 tem-se nas câmeras ré/nadir as matrizes de CCD de 3 a 6, e na câmera vante as matrizes de 5 a 8. Consequentemente, parte dos POI das matrizes de CCD estimados no experimento do tripleto 2 não se faz presente no conjunto de POI das matrizes de CCD no experimento com o tripleto 3.

No caso das fototriangulações sem estimativa em órbita dos POI, as orientações foram feitas com as imagens fusionadas com 14496 colunas, ou seja, como se fosse uma linha de CCD única com 14496 pixels. Foi considerado também que o PP é coincidente com o centro geométrico da matriz de CCD única. Os valores das distâncias focais utilizadas foram os valores nominais calibrados antes do lançamento do satélite, ou seja, 1939 mm (JAXA, 2012). Para os valores de

tamanho dos pixels na matriz de CCD única também foi utilizada a quantidade calibrada em Terra de 0,0071 mm. Os sistemas de coordenadas utilizados foram o SRI da imagem fusionada com 14496 colunas, o SRC e o SRT SIRGAS 2000.

Para a estimativa dos parâmetros utilizou-se o ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados com o método paramétrico, tendo em vista que as equações de colinearidade foram montadas de maneira a isolar as observações como função dos parâmetros de forma explícita. Os parâmetros a serem estimados nos ajustamentos para os conjuntos de experimentos são listados na Tabela 5.

TABELA 5 - PARÂMETROS A SEREM ESTIMADOS NOS AJUSTAMENTOS DOS EXPERIMENTOS.

Experimentos	Parâmetros nos ajustamentos por imagem	Nº de parâmetros por imagem	Nº total de parâmetros
1, 3, 5, 6, 8, 10	<p>Câmera ré: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$.</p> <p>Câmera nadir: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$.</p> <p>Câmera vante: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$.</p>	11	33
2, 7	<p>Câmera ré: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$, $a_{0_matriz1}, b_{0_matriz1}, a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}, a_{0_matriz4},$ $b_{0_matriz4}, a_{1_matriz1}, b_{1_matriz1}, a_{1_matriz3}, b_{1_matriz3},$ $a_{1_matriz4}, b_{1_matriz4}, \delta_{matriz1}, \delta_{matriz2}, \delta_{matriz3}$ e $\delta_{matriz4}, K_1, K_2, \Delta f$</p> <p>Câmera nadir: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$, $a_{0_matriz1}, b_{0_matriz1}, a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}, a_{0_matriz4},$ $b_{0_matriz4}, a_{1_matriz1}, b_{1_matriz1}, a_{1_matriz3}, b_{1_matriz3},$ $a_{1_matriz4}, b_{1_matriz4}, \delta_{matriz1}, \delta_{matriz2}, \delta_{matriz3}$ e $\delta_{matriz4}, K_1, K_2, \Delta f$</p> <p>Câmera vante: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$, $a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}, a_{0_matriz5}, b_{0_matriz5}, a_{0_matriz6},$ $b_{0_matriz6}, a_{1_matriz3}, b_{1_matriz3}, a_{1_matriz5}, b_{1_matriz5},$ $a_{1_matriz6}, b_{1_matriz6}, \delta_{matriz3}, \delta_{matriz4}, \delta_{matriz5}$ e $\delta_{matriz6}, K_1, K_2, \Delta f$</p>	30	90
4, 9	<p>Câmera ré: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2$, $a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}, a_{0_matriz5}, b_{0_matriz5}, a_{0_matriz6},$ $b_{0_matriz6}, a_{1_matriz3}, b_{1_matriz3}, a_{1_matriz5}, b_{1_matriz5},$ $a_{1_matriz6}, b_{1_matriz6}, \delta_{matriz3}, \delta_{matriz4}, \delta_{matriz5}$ e</p>	30	90

	$\delta_{matriz6}, K_1, K_2, \Delta f$ Câmera nadir: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2,$ $a_{0_matriz3}, b_{0_matriz3}, a_{0_matriz5}, b_{0_matriz5}, a_{0_matriz6},$ $b_{0_matriz6}, a_{1_matriz3}, b_{1_matriz3}, a_{1_matriz5}, b_{1_matriz5},$ $a_{1_matriz6}, b_{1_matriz6}, \delta_{matriz3}, \delta_{matriz4}, \delta_{matriz5}$ e $\delta_{matriz6}, K_1, K_2, \Delta f$ Câmera vante: $X_T, Y_T, Z_T, u_{xT}, u_{yT}, u_{zT}, \omega, \varphi, \kappa_0, d_1, d_2,$ $a_{0_matriz5}, b_{0_matriz5}, a_{0_matriz7}, b_{0_matriz7}, a_{0_matriz8},$ $b_{0_matriz8}, a_{1_matriz5}, b_{1_matriz5}, a_{1_matriz7}, b_{1_matriz7},$ $a_{1_matriz8}, b_{1_matriz8}, \delta_{matriz5}, \delta_{matriz6}, \delta_{matriz7}$ e $\delta_{matriz8}, K_1, K_2, \Delta f$		
--	--	--	--

FONTE: O AUTOR (2015)

Os pontos de controle receberam injunções relativas com peso também inversamente proporcionais às variâncias consideradas. Para as componentes planimétricas adotou-se o valor de desvio-padrão igual a 1 m. Isto tendo em vista que a precisão estimada da coleta das coordenadas no espaço objeto a partir das ortofotos foi de 1 pixel (1 m). Com relação ao desvio das componentes altimétricas, a partir da consideração da acuidade visual considerou-se as escalas das fotografias aéreas de 1:5000. Sendo tradicional em mapeamentos na escala citada, uma equidistância vertical de curvas de nível de 2,5 m, a precisão estimada da coleta das coordenadas altimétrica a partir do MDT foi estimada como a metade deste valor, ou seja, 1,25 m.

A análise da qualidade dos ajustamentos foi realizada observando-se tanto a precisão do mesmo, como a exatidão da extração de coordenadas tridimensionais no espaço objeto. Com relação à precisão dos ajustamentos foram analisados as raízes dos erros quadráticos médios (REQM) dos vetores dos resíduos das observações e os valores da precisão dos parâmetros estimados, obtidos a partir da MVC dos mesmos. Foram ainda aplicados os testes de hipótese com a distribuição do Qui-quadrado (χ^2) para comparar o valor do fator de variância da unidade de peso *a priori* (σ_0^2) com o fator de variância da unidade de peso *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$). As duas hipóteses neste caso foram: a hipótese básica (H_0) a qual define que estatisticamente $\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$, e a hipótese alternativa (H_1) que define $\sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$. Para os casos em que se têm injunções relativas no método paramétrico, o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ é dado por (CAMARGO, 2000):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{(V^T P V) + (V'^T P' V')}{n - u + s}, \quad (70)$$

onde V é o vetor dos resíduos das observações; P é a matriz peso das observações; V' é o vetor dos resíduos dos parâmetros injuncionados; P' é a matriz peso das injunções; n é o número de observações no sistema de equações; u é o número de parâmetros e; s é o número de parâmetros injuncionados. Por consequência tem-se para a estatística Qui-quadrado amostral (GEMAEL, 1994):

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u + s) = \frac{(V^T P V) + (V'^T P' V')}{\sigma_0^2}. \quad (71)$$

Conforme mencionado anteriormente, a análise da exatidão da extração de coordenadas tridimensionais no espaço objeto pôde ser efetuada utilizando-se pontos de verificação. Após a estimativa das coordenadas dos mesmos nos ajustamentos, houve a posterior comparação com as coordenadas extraídas das ortofotos. Calcularam-se então as REQM das discrepâncias das coordenadas. É importante ressaltar que a REQM deve ser estimado no SGL para as componentes X_L , Y_L e Z_L , a fim de evitar distorções de projeções cartográficas.

Com o objetivo de se averiguar a normalidade dos conjuntos amostrais de discrepâncias entre coordenadas nos diferentes experimentos, testes estatísticos de *Shapiro-Wilk* baseados na estatística W foram realizados. A estatística W calculada é dada por:

$$W_{calc} = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (72)$$

onde x_i são os valores da amostra ordenados de forma crescente do menor para o maior valor; n é o tamanho da amostra e; b é obtido por:

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i) & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i) & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases}, \quad (73)$$

com os valores de $\alpha - i + 1$ sendo tabelados e obtidos de acordo com o valor i/n . As hipóteses sobre a normalidade foram as seguintes:

$$\begin{cases} H_0: & \text{A amostra provém de uma população normal} \\ H_1: & \text{A amostra não provém de uma população normal.} \end{cases}$$

Estabelecido o nível de confiança $1 - \alpha = 95\%$, obtiveram-se os valores teóricos da estatística W , de forma que H_0 foi rejeitado nos casos em que $W_{calc} < W_{n,1-\alpha}$.

Nos casos em que se verificou a normalidade no conjunto amostral de discrepâncias de coordenadas, testes de hipótese baseados na estatística t de *student* foram realizados sobre as médias das discrepâncias. Isto com o objetivo de investigar a presença de tendências significativas. As hipóteses consideradas foram:

$$\begin{cases} H_0: \mu = 0 & \text{(hipótese básica)} \\ H_1: \mu \neq 0 & \text{(hipótese alternativa).} \end{cases}$$

onde μ representa a média amostral das discrepâncias em uma dada componente. O valor da estatística t de *student* calculada é dada por:

$$t = \frac{(\mu - \mu_0)}{\sigma} \sqrt{n}, \quad (74)$$

onde n é o numero de amostras, σ é o desvio-padrão amostral das discrepâncias das componentes e μ_0 é a média populacional considerada como zero (livre de tendência). Caso o valor do módulo de t amostral seja menor que o valor teórico $t_{gl,1-\alpha}$, a hipótese básica H_0 é aceita e a média amostral das discrepâncias, na componente analisada, pode ser considerada estatisticamente igual à zero, a um nível de confiança $1 - \alpha$. Por outro lado, caso a hipótese básica H_0 seja rejeitada, a média amostral das discrepâncias, na componente analisada, é considerada estatisticamente diferente de zero, a um nível de confiança $1 - \alpha$, indicando a presença de tendência significativa.

3.7 ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E DAS CORRELAÇÕES

Nas fototriangulações com estimativa dos POI em órbita, a análise de significância destes últimos é importante, uma vez que determina um conjunto mais adequado de POI para compor o modelo matemático funcional. O critério utilizado para averiguar a significância de um POI foi o da comparação do módulo do seu valor estimado com o valor do módulo de seu desvio-padrão. Neste caso, o POI é considerado não significativo quando o valor do módulo de seu desvio-padrão for maior do que do módulo do seu valor estimado.

A análise de significância ocorreu em etapas. Inicialmente, as fototriangulações foram realizadas com todos os POI, e, aqueles considerados não significativos foram identificados. Dentro do conjunto de POI não significativos de cada uma das três câmeras, foi identificado o que apresentou maior discrepância entre o módulo do valor estimado e o módulo do seu desvio-padrão, ou seja, o POI menos significativo. Posteriormente, uma nova fototriangulação é realizada, com o valor do POI menos significativo em cada câmera definido como zero e fixado com injunção absoluta. O procedimento se repetiu até que o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ se alterasse significativamente ou até que a exatidão nos pontos de verificação diminuísse.

Após a análise de significância, foram feitas análises com a matriz de correlações calculada a partir da MVC dos parâmetros ajustados. O objetivo destas análises é saber se algum POI apresenta possibilidade de perda do significado físico na estimativa devido à forte correlação com outro POI. Com o objetivo ainda de investigar a forte dependência entre os POI e os POE, os coeficientes de correlação entre os dois conjuntos de parâmetros também foram analisados. Conforme citado anteriormente, fortes correlações podem causar imprecisões nas estimativas dos POI, uma vez que pode ter ocorrido influência de algum POE. Se tal fato for verificado, utilizando-se os POI na reconstrução do espaço objeto de outro tripleto ou bloco de imagens PRISM, não existirá garantia de resultados exatos. O valor limite de coeficiente de correlação utilizado nesta pesquisa, acima do qual já se considera forte correlação é o valor maior ou igual a 0,75 ou 75%, conforme indicado por Vieira (2008). Para investigar na prática a usabilidade dos POI

estimados na fototriangulação das imagens do triplete 1, os mesmos foram inseridos na fototriangulação das imagens do triplete 3 como parâmetros adicionais com injunções relativas nas Equações de Colinearidade. A Figura 25 apresenta um gráfico de etapas do processo de análise da significância dos POI e das análises de correlações.

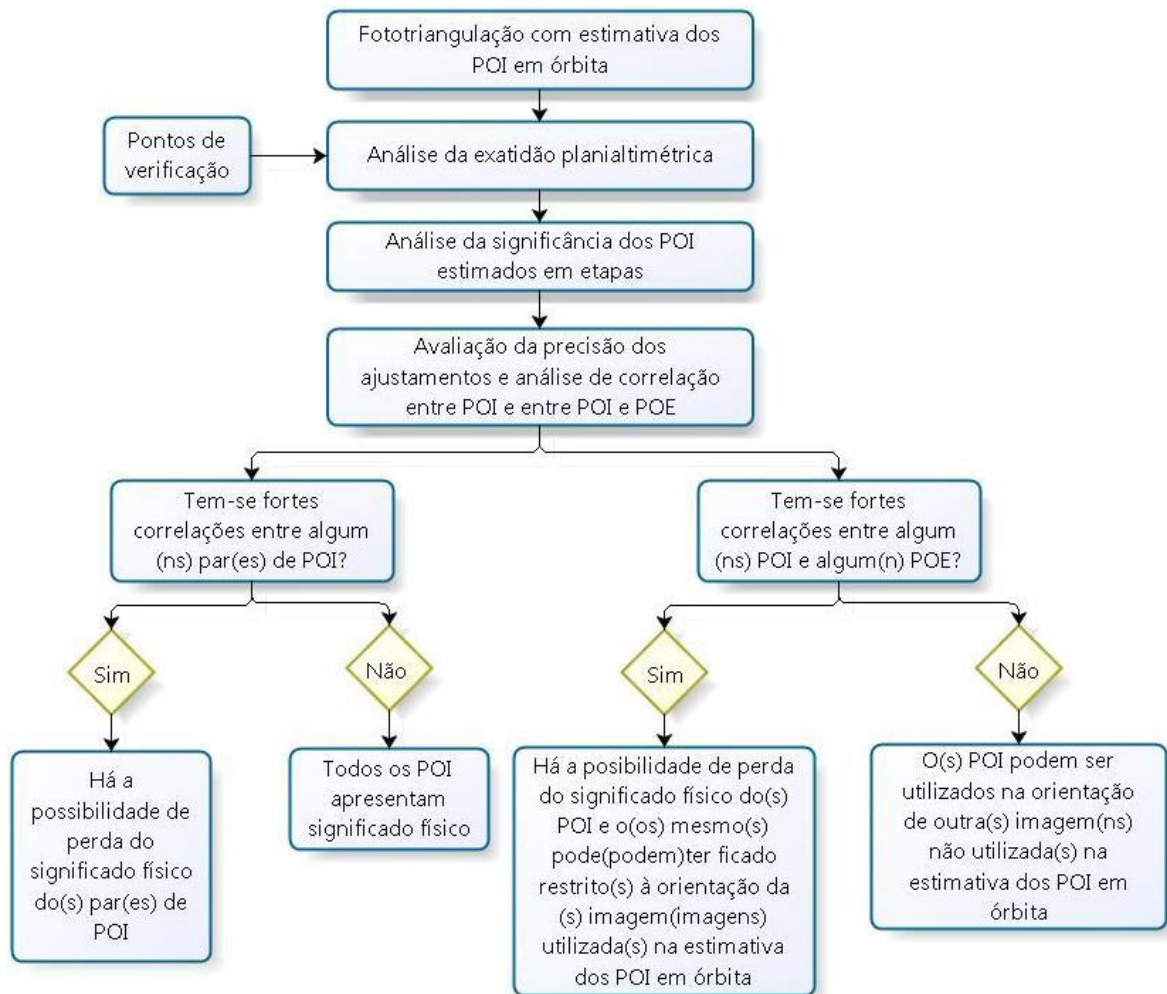


FIGURA 25 - PROCESSO DE ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS POI E DAS ANÁLISES DE CORRELAÇÕES.

FONTE: O AUTOR (2015).

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de cada um dos experimentos realizados. O item 4.1 apresenta os resultados dos experimentos com o uso do modelo de plataforma UCL. Já o item 4.2 apresenta os resultados com o uso do modelo de plataforma J2.

4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS UTILIZANDO O MODELO DE PLATAFORMA UCL

4.1.1 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL

Este experimento, denominado aqui de experimento 1, refere-se à fototriangulação das imagens do tripleto 1, sem a consideração da estimativa dos POI em órbita. Este experimento foi realizado com o objetivo de se comparar os resultados de exatidão planialtimétrica nos pontos de verificação com os resultados do experimento de fototriangulação com estimativa dos POI em órbita.

No ajustamento, a precisão das observações foi considerada como 1 pixel (0,0071 mm). Depois de realizado o ajustamento, a precisão do mesmo foi analisada, com base nos valores de REQM dos vetores dos resíduos das observações (V) e no teste de hipótese utilizando a distribuição Qui-quadrado sobre a igualdade dos fatores de variância da unidade de peso *a priori* e *a posteriori*. Na Tabela 6 são apresentados os resultados.

TABELA 6 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 1.

Experimento 1		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0841$		
$\chi_{CALC}^2 = 313,3064$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 243,8012$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 337,9855$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0022	0,0027	0,0028
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0028	0,0029	0,0040

FONTE: O AUTOR (2015).

A partir da análise da Tabela 6, observa-se que no teste de hipótese de igualdade entre $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 (com $\sigma_0^2 = 1$), a partir da distribuição Qui-quadrado, a hipótese básica foi aceita a um nível de confiança de 95%. Com relação à REQM dos vetores dos resíduos das observações, os valores mostraram-se adequados para as três imagens do tripleto, apresentando-se menores que o valor da precisão das observações de 0,0071 mm. Adicionalmente, a partir da Tabela 7 verifica-se que os valores dos resíduos das observações nas componentes x_s e y_s para as três imagens também se mostraram adequados, tendo em vista que de todo este conjunto de valores, mais de 98% apresentaram-se menores que um pixel. Os valores máximos dos módulos das componentes Vx e Vy ($máx(|Vx|)$ e $máx(|Vy|)$) para as três imagens também são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 1.

Experimento 1					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
$máx(Vx)$	$máx(Vy)$	$máx(Vx)$	$máx(Vy)$	$máx(Vx)$	$máx(Vy)$
0,0069	0,0116	0,0091	0,0159	0,0110	0,0092
98,19% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

Depois de executada a fototriangulação, a análise das exatidões foi realizada com base nos pontos de verificação. As coordenadas dos 24 pontos estimados nos ajustamentos foram comparadas com as coordenadas extraídas das ortofotos e MDT, e, em seguida foram calculados as médias e os desvios-padrão das

discrepâncias. Conforme citado no item 3.6, todos os cálculos ocorreram no SGL, com o objetivo de evitar distorções de projeções cartográficas. Na Tabela 8 são apresentados os valores de média e desvio-padrão para as três componentes do SGL.

TABELA 8 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 1.

Experimento 1			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,0776	-0,0028	-3,3045
σ	1,5135	1,8709	4,0033

FONTE: O AUTOR (2015).

Com a finalidade de analisar graficamente o comportamento das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação as mesmas foram plotadas no gráfico apresentado na Figura 26. Uma vez que se adotou como exatidão planimétrica resultante esperada o valor de 1 GSD (2,5 m), no gráfico foi desenhado um círculo com raio equivalente a este valor para indicá-la graficamente.

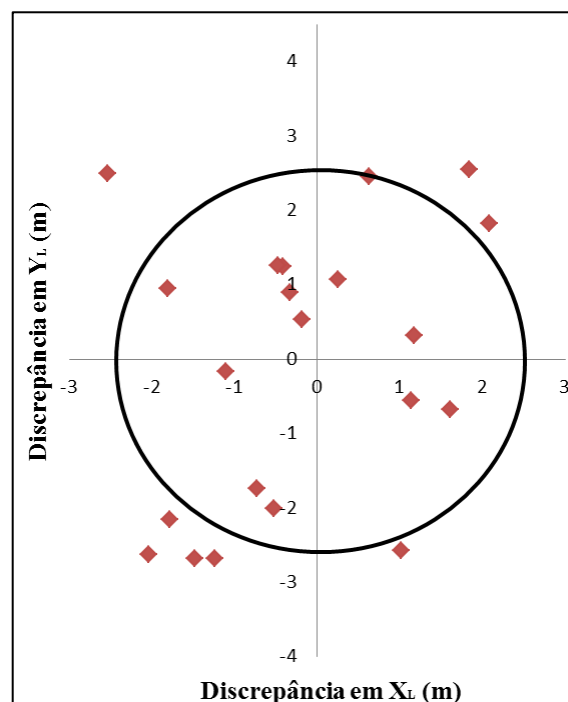


FIGURA 26 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 1.

FONTE: O AUTOR (2015).

Foram também analisadas graficamente as discrepâncias altimétricas. A fim de se obter o valor da exatidão altimétrica esperado, a relação base/altura de órbita foi utilizada, conforme apresentado na Equação (75) (ALBERTZ; KREILING, 1980).

$$d_z = \pm \frac{h^2}{B\bar{f}} d_{px} , \quad (75)$$

onde h é a altitude elipsoidal nominal da órbita de 691,65 km subtraída da altitude elipsoidal média dos pontos de controle e verificação de 394,7 m, sendo igual à 691,25526 km; B é a base fotogramétrica entre as imagens ré e vante, obtida de forma aproximada a partir dos vetores de estado das primeiras linhas das imagens ré e vante, igual à 699,965 km; \bar{f} é a distância focal média das câmeras ré e vante, igual à 1999,93 mm e; d_{px} é a precisão de medida da paralaxe, assumida como o valor de 1 pixel nominal (0,0071 mm). Após o cálculo, o valor da exatidão altimétrica esperada encontrado foi de 2,42 m.

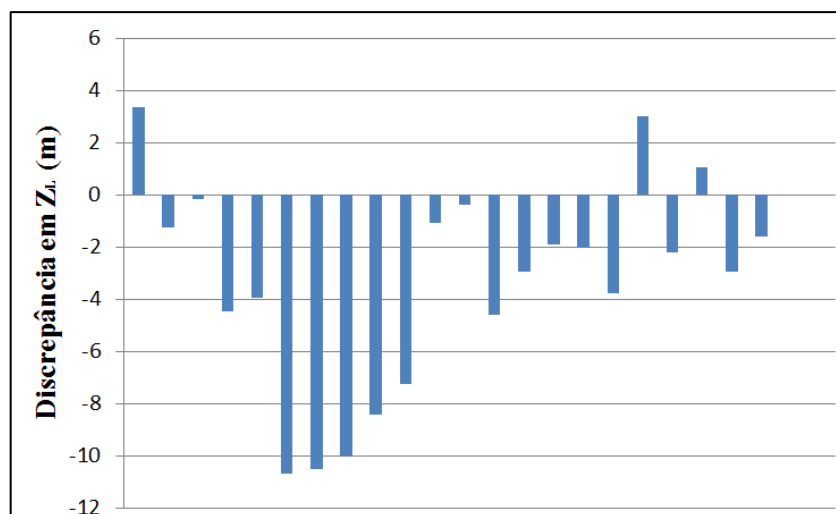


FIGURA 27 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 1.

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 26, as discrepâncias nas componentes X_L e Y_L não apresentaram uma direção e sentido predominantes, isto é, não apresentaram uma tendência significativa. Tal fato também pode ser constatado observando-se os valores de média iguais a -0,0776 m e -0,0028 m respectivamente nas componentes X_L e Y_L (Tabela 8). Observa-se também que 9

dos 22 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada. Na componente Z_L , verifica-se que houve uma tendência para valores negativos, o que é indicado também pelo valor da média de -3,3045 m. No que diz respeito aos valores, tem-se que 13 dos 22 pontos apresentaram-se com discrepância maior do que o valor de exatidão altimétrica esperado.

Com o objetivo de auxiliar as análises visuais obtidas sobre os gráficos, a normalidade nas amostras das discrepâncias foram verificadas a partir do teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, baseado na distribuição W . O teste foi realizado para cada componente do SGL. Conforme pode ser observado na Tabela 9, a um nível de confiança de 95%, os valores amostrais da estatística W nas componentes X_L e Z_L se apresentaram maiores do que os valores teóricos, indicando a aceitação da hipótese básica. Assim sendo, as amostras de discrepâncias nas componentes citadas foram consideradas com distribuição normal, mesmo as discrepâncias na componente Z_L graficamente apresentando uma tendência significativa. Por outro lado, na componente Y_L o valor amostral da estatística W se apresentou menor do que o valor teórico tabelado, levando a rejeição da hipótese básica e a indicação de que a amostra nesta componente não apresenta uma distribuição normal, podendo estar eivada de erros sistemáticos.

TABELA 9 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 1.

Experimento 1		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,972$	$W_{CALC} = 0,904$	$W_{CALC} = 0,941$
$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$

FONTE: O AUTOR (2015).

De modo a averiguar se o valor da média amostral das discrepâncias nas componentes X_L e Z_L podem ser considerados estatisticamente iguais à zero, ou seja, isentas de tendências significativas, o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student* foi realizado. Dispondo-se dos valores de médias e desvios-padrão amostrais das discrepâncias nas duas componentes, os valores das estatísticas t amostrais foram calculados (Tabela 10).

TABELA 10 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 1.

Experimento 1		
	ΔX_L (m)	ΔZ_L (m)
$ t $	0,2404	3,8717
$t_{21;0,975}$	2,0796	2,0796

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao considerar um nível de confiança de 95% e que o grau de liberdade foi de 21 (nº de pontos de verificação menos um), o valor da estatística t teórica é igual à 2,0796. Conforme pode ser visto, o valor amostral da estatística t na componente X_L se apresentou menor do que o valor teórico. Isto indica que a hipótese básica não foi rejeitada ao nível de confiança de 95% e, conseqüentemente a média amostral da discrepância nesta componente pode ser considerada estatisticamente igual à zero. Em contrapartida, na componente Z_L o valor de t amostral apresentou-se maior do que o valor teórico, indicando a rejeição da hipótese básica e que a média amostral de discrepâncias nesta componente não pode ser considerada estatisticamente igual à zero. Tal resultado na componente altimétrica indica a presença de tendências significativas provenientes provavelmente de erros sistemáticos não modelados.

Para a análise de exatidão da fototriangulação, a partir das discrepâncias nos pontos de verificação, as REQM nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram calculados. Os resultados são apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 1.

Experimento 1		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
1,4808	1,8279	5,1204

FONTE: O AUTOR (2015).

Observa-se a partir dos dados da Tabela 11 que as exatidões nas componentes X_L e Y_L foram menores que o valor do GSD, chegando a aproximadamente 1,48 m e 1,82 m respectivamente, ou seja, em torno de 59% e 73% do valor do GSD. A exatidão na componente altimétrica apresentou-se com o valor aproximado de 5,1 m.

4.1.2 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 com estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL

No experimento 2 realizou-se a fototriangulação das imagens do tripleto 1, com a estimativa dos POI em órbita. O objetivo principal deste experimento foi realizar a fototriangulação das imagens do tripleto 1 com a estimativa dos POI mais significativos em órbita, e se os mesmos são importantes para aumentar a exatidão planialtimétrica da fototriangulação sem estimativa dos POI.

Primeiramente foi realizada a fototriangulação com todos os POI indicados nas Equações (64) e (65) presentes no modelo matemático funcional. Após o primeiro ajustamento, iniciou-se a análise de significância com base na análise do valor de cada POI e de seu desvio-padrão, em etapas. Após quatorze etapas o conjunto de POI foi definido, uma vez que não houve mais nenhum POI não significativo. Os valores dos POI estimados e de suas precisões são apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 2.

POI		Câmera ré	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	-0,0386	0,0167
$b_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0688	0,0160
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0120	0,0058
$a_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0145	0,0097
Δf	σ (mm)	2,1501	1,7158
POI		Câmera nadir	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0281	0,0077
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0247	0,0129
$b_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0637	0,0289
$\delta_{matriz2}$	σ (rad)	$3,96 \times 10^{-6}$	$1,64 \times 10^{-6}$
Δf	σ (mm)	2,4863	1,3128
POI		Câmera vante	
$a_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0506	0,0087
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0301	0,0127
		0,0327	0,0142
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0642	0,0272

$b_{0_matriz6}$	σ (mm)	1,7388	1,2220
Δf	σ (mm)		

FONTE: O AUTOR (2015).

Com relação ao conjunto de POI definido, pode-se verificar que para as três câmeras, todos os parâmetros a_1 e b_1 de todas as matrizes de CCD e os parâmetros K_1 e K_2 não se mostraram significantes. Com exceção do POI $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir, todos os parâmetros de flexão δ das matrizes de CCD nas três câmeras também foram encontrados não significantes.

A fim de investigar uma possível simplificação nos modelos matemáticos funcionais, as correlações entre os POI foram analisadas. A justificativa para tal procedimento é que em teoria, se um POI é fortemente correlacionado com outro, um pode modelar parte do efeito do outro. Assim sendo, um dos dois pode ser desconsiderado. A Tabela 13 a seguir apresenta os valores dos coeficientes de correlação.

TABELA 13 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI NO EXPERIMENTO 2.

Câmera ré					
	$a_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz4}$	Δf
$a_{0_matriz1}$	1.00				
$b_{0_matriz1}$	0.16	1.00			
$b_{0_matriz3}$	-0.19	0.22	1.00		
$a_{0_matriz4}$	-0.95	-0.16	0.17	1.00	
Δf	-0.35	0.42	0.37	0.34	1.00
Câmera nadir					
	$a_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz4}$	$\delta_{matriz2}$	Δf
$a_{0_matriz1}$	1.00				
$b_{0_matriz3}$	0.41	1.00			
$b_{0_matriz4}$	0.54	0.81	1.00		
$\delta_{matriz2}$	0.80	0.28	0.37	1.00	
Δf	0.00	0.14	0.18	-0.02	1.00
Câmera vante					
	$a_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz6}$	Δf
$a_{0_matriz3}$	1.00				
$b_{0_matriz3}$	-0.88	1.00			
$b_{0_matriz5}$	-0.76	0.89	1.00		

$b_{0_matriz6}$	-0.81	0.87	0.89	1.00	
Δf	-0.56	0.62	0.55	0.58	1.00

Fonte: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser visto na Tabela 13, na câmera ré houve um caso de forte correlação entre os POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$, e na câmera nadir houve dois casos de forte correlação: entre os POI $b_{0_matriz3}$ e $b_{0_matriz4}$, e entre os POI $\delta_{matriz2}$ e $a_{0_matriz1}$. Na câmera vante todos os POI referentes às alterações sistemáticas dos posicionamentos das matrizes de CCD nos planos focais, apresentaram-se fortemente correlacionados uns com os outros.

Ao analisar as fortes correlações ocorridas, algumas tentativas de simplificação dos modelos matemáticos funcionais foram realizadas. Conforme mencionado anteriormente, se um POI é fortemente correlacionado com outro, um dos dois pode ser desconsiderado. A desconsideração do POI é feita adotando o valor do mesmo como zero e aplicando sobre ele uma injunção absoluta. Após as tentativas, verificou-se que apenas o POI $\delta_{matriz2}$ pode ser desconsiderado sem prejuízo na exatidão planialtimétrica da fototriangulação. As tentativas com suas configurações e a indicação de piora ou melhora na exatidão planialtimétrica da fototriangulação são apresentadas na Tabela 14.

TABELA 14 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI NO EXPERIMENTO 2.

Tentativas	Configuração	Situação da exatidão planialtimétrica
1ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir	Exatidão não alterada
2ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem $a_{0_matriz4}$ na câmera ré	Piorou a exatidão
3ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem $a_{0_matriz1}$ na câmera ré	Piorou a exatidão
4ª	Sem $\delta_{matriz2}$ e $b_{0_matriz4}$ na câmera nadir	Piorou a exatidão
5ª	Sem $\delta_{matriz2}$ e $b_{0_matriz3}$ na câmera nadir	Piorou a exatidão
6ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem $b_{0_matriz6}$ na câmera vante	Piorou a exatidão
7ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem	Piorou a exatidão

	$b_{0_matriz5}$ na câmera vante	
8ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem $b_{0_matriz3}$ na câmera vante	Piorou a exatidão
9ª	Sem $\delta_{matriz2}$ na câmera nadir e sem $a_{0_matriz3}$ na câmera vante	Piorou a exatidão

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao considerar os resultados da análise de significância e de simplificação dos modelos matemáticos funcionais, observa-se que os efeitos de rotação e flexão nas matrizes de CCD, de mudanças das dimensões dos pixels na direção de y_s e das distorções radiais simétricas nas três câmeras puderam ser desconsiderados sem prejuízo na exatidão da fototriangulação. Por outro lado, quase todos os parâmetros corretivos a_0 e b_0 referentes às alterações sistemáticas das translações dx e dy dos centros geométricos das matrizes de CCD para o PP nos planos focais foram considerados significativos, assim como o POI Δf para todas as três câmeras. Os valores finais dos POI considerados após a simplificação dos modelos matemáticos funcionais são apresentados na Tabela 15.

TABELA 15 – POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 2 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.

POI		Câmera ré	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	-0,0386	0,0167
$b_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0688	0,0159
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0120	0,0058
$a_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0145	0,0097
Δf	σ (mm)	2,1501	1,7129
POI		Câmera nadir	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0281	0,0077
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0247	0,0129
$b_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0637	0,0289
Δf	σ (mm)	2,4863	1,3105
POI		Câmera vante	
$a_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0506	0,0087
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0301	0,0127
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0327	0,0142
$b_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0642	0,0271

Δf	σ (mm)	1,7388	1,2199
------------	---------------	--------	--------

FONTE: O AUTOR (2015).

Após o ajustamento final com o conjunto de POI definido, a precisão do mesmo foi analisada da mesma forma que no experimento anterior. A precisão das observações neste experimento também foi considerada de 1 pixel (0,0071 mm). A Tabela 16 apresenta os resultados da precisão do ajustamento.

TABELA 16 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 2.

Experimento 2		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 0,9244$		
$\chi_{CALC}^2 = 267,1556$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 242,8828$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 337,9855$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0022	0,0025	0,0025
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0027	0,0026	0,0038

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser observado na Tabela 16, a hipótese nula ($\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$) no teste de hipótese baseado na distribuição do qui-quadrado não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Observa-se também que os valores dos REQM das componentes de V apresentaram-se abaixo do valor da precisão das observações (0,0071 mm). Tais resultados indicam que as ponderações foram apropriadas e os valores das componentes x_s e y_s dos resíduos para as três imagens apresentaram-se adequados. Este último pode ser confirmado observando-se os resultados apresentados na Tabela 17, que mostram a porcentagem de valores de resíduos menores que o valor de um pixel e os valores máximos dos módulos das componentes x_s e y_s dos resíduos para as três imagens.

TABELA17 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 2.

Experimento 2					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
<i>máx (V_x)</i>	<i>máx (V_y)</i>	<i>máx (V_x)</i>	<i>máx (V_y)</i>	<i>máx (V_x)</i>	<i>máx (V_y)</i>
0,0082	0,0126	0,0082	0,0130	0,0088	0,0071
98,39% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

De maneira análoga ao realizado no experimento 1, após realizada a fototriangulação, as médias e desvios-padrão das discrepâncias planialtimétricas para os pontos de verificação foram calculadas. Os valores nas três componentes do SGL são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 2.

Experimento 2			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,2712	-0,4271	-1,5886
σ	1,2359	1,1130	3,4928

FONTE: O AUTOR (2015).

A fim de analisar de forma gráfica o comportamento das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L , as mesmas foram plotadas nos gráficos apresentados nas Figuras 28 e 29. De forma similar ao experimento anterior a exatidão planimétrica esperada foi considerada de 1 GSD (2,5 m), e a altimétrica foi estimada pela Equação (75), sendo igual a 2,42 m.

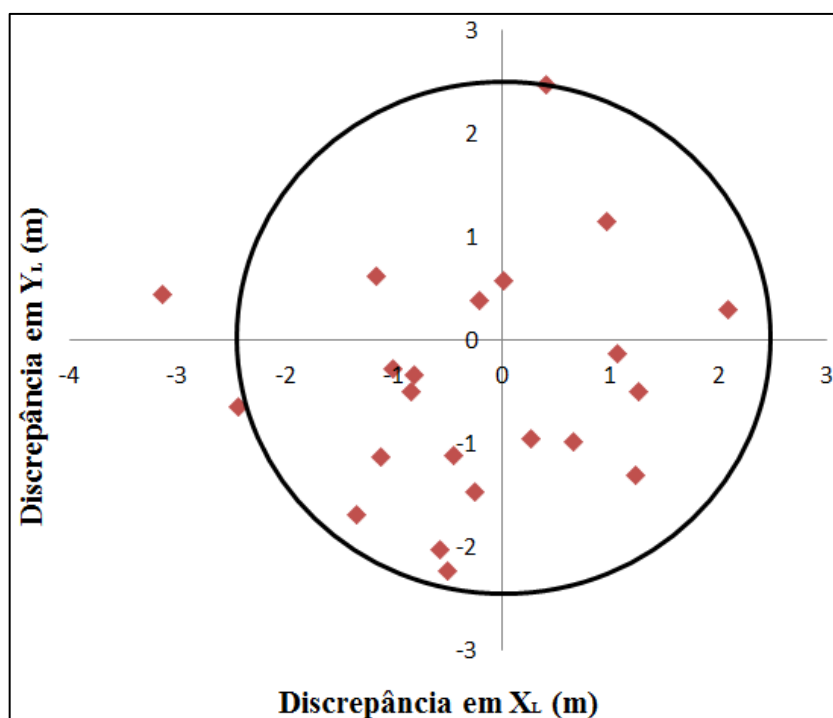


FIGURA 28 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 2.

FONTE: O AUTOR (2015).

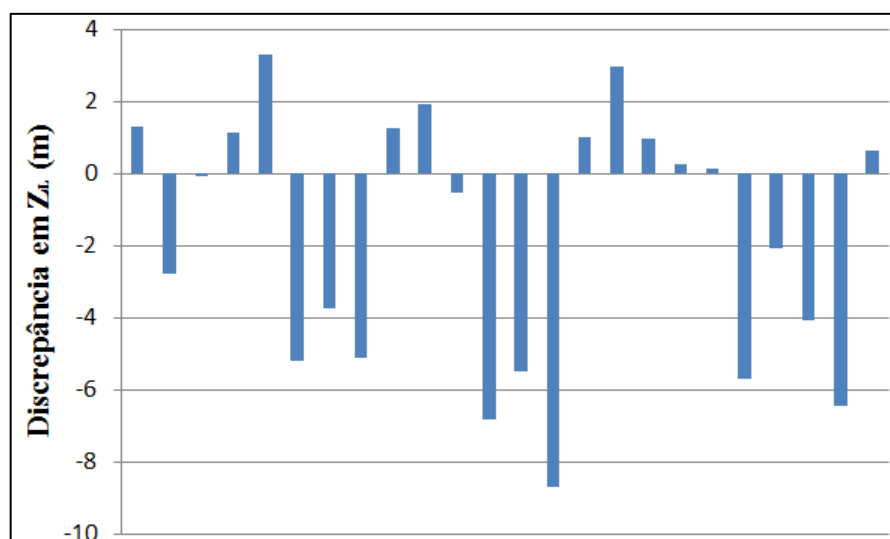


FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 2.

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao observar o gráfico da Figura 28, nota-se que as discrepâncias nas componentes planimétricas apresentaram uma ligeira tendência no sentido Sudoeste, conforme também pode ser visto a partir dos valores das médias das

discrepâncias em X_L e Y_L , de -0,2712 m e -0,4271 respectivamente. Observa-se também que apenas 3 dos 22 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada, isto é, aproximadamente 27% menos do que no experimento 1. Na componente Z_L , verifica-se que, embora haja ainda certa tendência para valores negativos, que pode ser confirmada pelo valor da média das discrepâncias nesta componente (-1,5886 m), há uma melhoria na distribuição das discrepâncias em relação à distribuição do experimento 1. Outra questão também verificada na componente altimétrica é que 11 dos 22 pontos apresentaram-se com discrepância maior do que o valor de exatidão altimétrica esperado, dois a menos do que no experimento anterior.

Para verificar estatisticamente a normalidade nas amostras das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L , o teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, baseado na distribuição W foi realizado. Os valores amostrais e teóricos da estatística W são apresentados na Tabela 19. Conforme pode ser visto, as distribuições das amostras de discrepâncias nas três componentes foram consideradas normais, com um nível de confiança de 95%. Isto tendo em vista que os valores amostrais se apresentaram acima dos valores teóricos (hipóteses básicas não rejeitadas).

TABELA 19 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 2.

Experimento 2		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,973$	$W_{CALC} = 0,964$	$W_{CALC} = 0,920$
$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$

FONTE: O AUTOR (2015).

Com o intuito de investigar ainda se os valores das médias amostrais das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L podem ser considerados como sendo estatisticamente iguais à zero (livre de tendências significativas), o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student* foi realizado. A Tabela 20 apresenta os valores das estatísticas t .

TABELA 20 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 2.

Experimento 2			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
$ t $	1,0292	1,7999	2,1333
$t_{21;0,975}$	2,0796	2,0796	2,0796

FONTE: O AUTOR (2015).

Com um grau de liberdade igual a 21 e um nível de confiança de 95%, o valor da estatística t teórica é de 2,0796. Uma vez que os valores de t amostrais nas componentes X_L e Y_L apresentaram-se abaixo do valor teórico, as médias amostrais das discrepâncias nestas componentes foram consideradas estatisticamente livres de tendências significativas, a um nível de confiança de 95%. Por outro lado, na componente Z_L o valor amostral da estatística t apresentou-se acima do valor teórico tabelado, levando à rejeição da hipótese básica. Tal resultado indica que mesmo após a estimativa dos POI em órbita na fototriangulação, uma certa parcela de erros sistemáticos ainda permanece nas discrepâncias da componente altimétrica. Resultado similar também foi obtido por Kocaman e Gruen (2007b).

Para analisar a exatidão da fototriangulação as REQM das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram calculados. Na Tabela 21 são apresentados os resultados.

TABELA 21 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 2.

Experimento 2		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
1,2376	1,1683	3,7642

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado na Tabela 21, os valores de REQM nas componentes X_L e Y_L mostraram-se em torno de 1,24 e 1,17 m respectivamente, sendo iguais a aproximadamente 49,5% e 47% do valor do GSD. Na componente Z_L o valor da REQM foi de aproximadamente 3,76 m. Ao comparar-se os valores de REQM do experimento 2 com os do experimento 1, nota-se que a fototriangulação com estimativa dos POI em órbita apresentou melhorias de exatidão nas componentes X_L , Y_L e Z_L de 0,24 m, 0,66 m e 1,36 m respectivamente.

Planimetricamente, a melhoria em exatidão resultante foi de 0,65 m. As representações gráficas das exatidões planimétricas e altimétricas resultantes nos experimentos 1 e 2 são apresentadas na Figura 30.

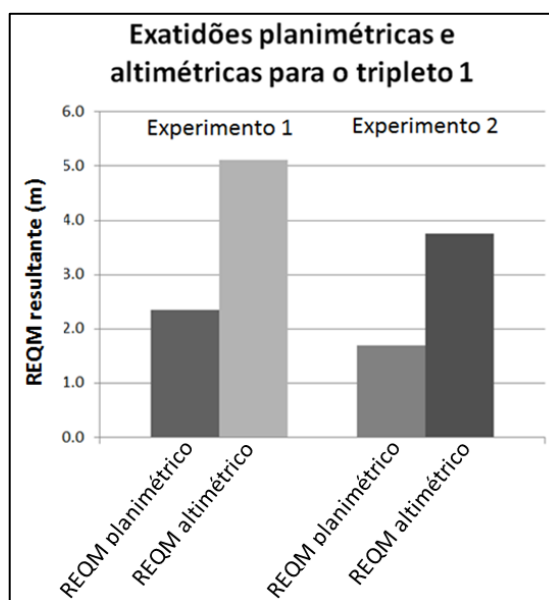


FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 1 E 2.

FONTE: O AUTOR (2015).

Após a definição do conjunto final de POI, com o objetivo de averiguar se os seus valores estimados podem ter perdido ou não o significado físico, as correlações entre os POI foram analisadas. Nas Tabelas 22, 23 e 24 apresentam-se os resultados de coeficientes de correlação entre os POI nas três câmeras. Nesta pesquisa, assumiu-se como sendo correlação forte o valor maior ou igual a 0,75 (75%) para o coeficiente de correlação. Valores maiores que essa tolerância são apresentados em vermelho.

TABELA 22 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 2.

Câmara ré					
	$a_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz4}$	Δf
$a_{0_matriz1}$	1,00				
$b_{0_matriz1}$	0,16	1,00			
$b_{0_matriz3}$	-0,19	0,22	1,00		
$a_{0_matriz4}$	-0,95	-0,16	0,17	1,00	
Δf	-0,35	0,42	0,37	0,34	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 23 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 2.

Câmara nadir				
	$a_{0_matriz1}$	$b_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz4}$	Δf
$a_{0_matriz1}$	1,00			
$b_{0_matriz3}$	0,41	1,00		
$b_{0_matriz4}$	0,54	0,81	1,00	
Δf	0,00	0,14	0,18	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 24 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO EXPERIMENTO 2.

Câmara vante					
	$a_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz6}$	Δf
$a_{0_matriz3}$	1,00				
$b_{0_matriz3}$	-0,88	1,00			
$b_{0_matriz5}$	-0,76	0,89	1,00		
$b_{0_matriz6}$	-0,81	0,87	0,89	1,00	
Δf	-0,56	0,62	0,55	0,58	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24 é possível identificar que os casos de forte correlação verificados na Tabela 12, isto é, antes da desconsideração do POI $\delta_{matriz2}$ da câmera nadir, permaneceram. Na câmera ré os POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ se apresentaram fortemente correlacionados; na câmera nadir os POI $b_{0_matriz3}$ e $b_{0_matriz4}$ apresentaram forte correlação um com o outro e;

na câmera vante todos os POI a_0 e b_0 apresentaram-se fortemente correlacionados uns com os outros. Os valores de fortes correlações entre os POI apresentados indicam uma provável determinação local sem o significado físico pretendido.

Foram também analisados os coeficientes de correlação entre os POI e os POE, com o objetivo de verificar a forte dependência entre parâmetros. Tal forte dependência deve ser investigada na medida em que pode causar imprecisões na estimativa dos POI, uma vez que o valor do POI estimado pode ter tido influência de algum POE. Como consequência, se os POI forem utilizados na reconstrução do espaço objeto de outro triplete ou bloco de imagens PRISM, não existirá garantia de que os mesmos funcionem da mesma maneira. Desta forma, esta análise representa uma análise teórica de possível usabilidade dos POI estimados no experimento 2 em orientações de outra(s) imagem(ns) não participante(s) do processo de estimativa dos POI em órbita. Na Tabela 25 apresentam-se os valores de coeficientes de correlação.

TABELA 25 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE POI E OS POE NO EXPERIMENTO 2.

Câmera ré											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$a_{0_matriz1}$	0,00	-0,14	-0,01	-0,08	0,00	0,04	0,57	-0,22	0,92	0,12	0,22
$b_{0_matriz1}$	0,01	-0,01	0,00	0,07	0,00	0,10	0,11	-0,05	0,14	0,01	-0,33
$b_{0_matriz3}$	0,03	-0,02	-0,07	0,29	-0,07	0,37	-0,12	0,04	-0,19	-0,05	-0,61
$a_{0_matriz4}$	0,00	-0,10	0,01	-0,13	0,00	-0,07	-0,59	0,23	-0,95	0,13	-0,17
Δf	0,21	0,06	-0,34	0,07	-0,43	0,01	-0,20	0,08	-0,36	-0,03	-0,58
Câmera nadir											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$a_{0_matriz1}$	0,00	0,09	0,00	0,13	0,00	0,08	0,19	-0,08	0,25	-0,12	0,21
$b_{0_matriz3}$	-0,05	0,14	0,03	0,24	0,01	0,25	0,15	-0,04	0,21	-0,17	-0,61
$b_{0_matriz4}$	-0,06	0,23	0,08	0,15	0,02	-0,16	0,17	-0,05	0,21	-0,20	-0,17
Δf	0,55	0,04	-0,66	-0,03	-0,35	-0,16	0,02	0,00	0,01	0,00	-0,13
Câmera vante											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$a_{0_matriz3}$	0,00	0,14	0,00	0,14	0,00	-0,49	0,04	-0,19	0,04	-0,14	0,21
$b_{0_matriz3}$	0,00	-0,12	0,01	-0,12	0,01	0,49	-0,09	0,45	-0,10	0,12	-0,41
$b_{0_matriz5}$	-0,03	0,01	0,03	0,02	-0,01	0,31	-0,07	0,41	-0,08	-0,01	-0,56
$b_{0_matriz6}$	-0,02	0,05	0,04	0,04	-0,01	0,45	-0,07	0,36	-0,07	-0,04	-0,13

Δf	0,55	-0,07	-0,53	-0,08	0,05	0,38	-0,05	0,29	-0,06	0,07	-0,17
------------	------	-------	-------	-------	------	------	-------	------	-------	------	-------

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado na Tabela 25, apenas na câmera ré houve dois casos de fortes correlações, entre o POI $a_{0_matriz1}$ e o POE κ_0 , e entre o POI $a_{0_matriz4}$ e o mesmo POE. Nas câmeras nadir e vante não houve nenhum caso de ocorrência de forte correlação entre POI e POE. Ao analisar-se teoricamente a possível usabilidade dos POI na orientação de outras imagens que não participaram do experimento 2, todos os POI das câmeras nadir e vante são passíveis de serem utilizados. Da câmera ré, todos os POI são passíveis de serem utilizados, desde que observado o fato de que o uso dos POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ pode vir a causar imprecisões nas orientações, uma vez que suas estimativas tiveram influências do ângulo κ_0 . A análise prática de usabilidade dos POI estimados neste experimento 2 na fototriangulação de imagens do tripleto 3 será realizada no experimento 5.

4.1.3 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL

Conforme mencionado anteriormente no item 3.6, as matrizes de CCD que formaram as imagens do tripleto 2 não foram as mesmas que formaram as imagens do tripleto 1. No tripleto 1, para as câmeras ré e nadir foram utilizadas as matrizes de CCD de 1 a 4, e para a câmera vante foram utilizadas as matrizes de 3 a 6. Já no tripleto 2, para as câmeras ré e nadir foram utilizadas as matrizes de CCD de 3 a 6, e para a câmera vante foram utilizadas as matrizes de 5 a 8. Diante disso, com o objetivo de efetuar uma análise comparativa com os experimentos que utilizaram as imagens do tripleto 1, dois experimentos foram realizados com as imagens do tripleto 2. No primeiro denominado de experimento 3 foi realizada a fototriangulação sem estimativa dos POI em órbita. Já no segundo, denominado aqui de experimento 4, a fototriangulação foi realizada com a estimativa dos POI em órbita. Este subitem apresenta os resultados do experimento 3.

Assim como nos experimentos com as imagens do tripleto 1, após realizado o ajustamento, a precisão do mesmo foi analisada. A Tabela 26 apresenta os

resultados para a análise. A precisão das observações foi considerada como 1 pixel (0,0071 mm).

TABELA 26 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 3.

Experimento 3		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 1,1289$		
$\chi_{CALC}^2 = 301,4209$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 223,6313$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 314,1553$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0038	0,0055	0,0039
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0019	0,0016	0,0021

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser visto na Tabela 26, o valor da estatística qui-quadrado amostral apresentou-se menor do que o valor teórico. Assim sendo, no teste de hipótese sobre a igualdade de $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 a hipótese nula não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Tendo em vista tal resultado, constata-se que as ponderações e que os valores dos resíduos apresentaram-se adequados. Tal fato pode ser constatado observando-se que os valores das REQM das componentes x_s e y_s dos resíduos mostraram-se menores que o valor da precisão das observações nas três imagens, e que mais de 95% dos resíduos apresentaram-se menores que um pixel (Tabela 27).

TABELA 27 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 3.

Experimento 3					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
máx (Vx)	máx (Vy)	máx (Vx)	máx (Vy)	máx (Vx)	máx (Vy)
0,0113	0,0060	0,0165	0,0040	0,0111	0,0065

98,19% dos valores abaixo de 1 pixel

FONTE: O AUTOR (2015).

Com os POE e as coordenadas dos pontos de verificação estimadas na fototriangulação, foram calculados as médias e os desvios-padrão das discrepâncias calculadas em relação às coordenadas dos pontos de verificação extraídos das

ortofotos e MDT. Os valores para as componentes planimétrica e altimétrica encontram-se na Tabela 28.

TABELA 28 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 3.

Experimento 3			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	0,0619	0,5119	-0,9426
σ	1,2403	2,1008	6,3009

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme realizado nos experimentos 1 e 2, os comportamentos das discrepâncias planimétricas foram analisados graficamente (Figura 31). Como exatidão planimétrica esperada assumiu-se o valor de 1 GSD (2,5 m).

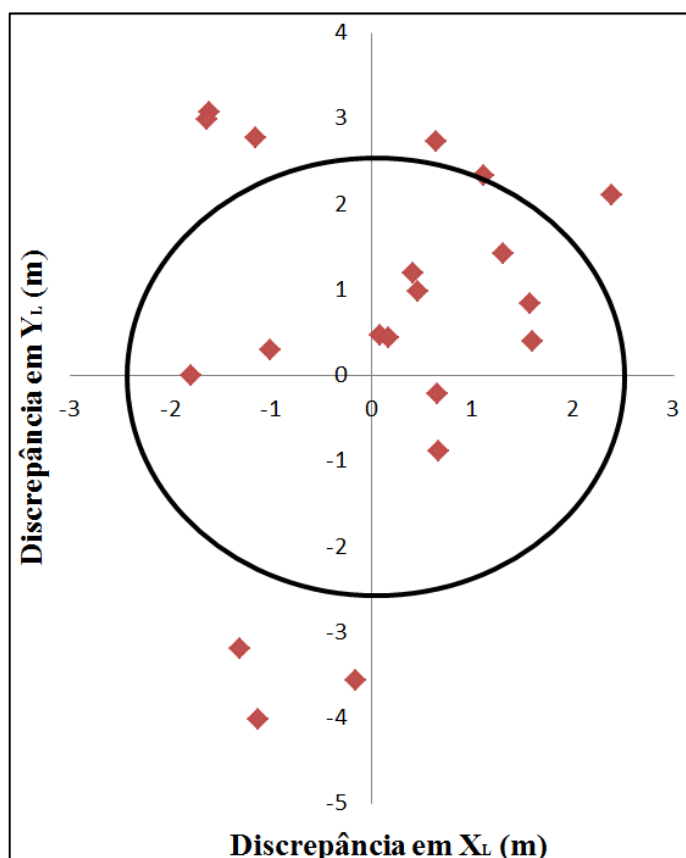


FIGURA 31 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 3.

FONTE: O AUTOR (2015).

As discrepâncias altimétricas também foram analisadas graficamente (Figura 32). O valor da exatidão altimétrica esperada foi calculada pela Equação (75) da mesma forma que nos experimentos anteriores, sendo $h = 691,217$ km, $B = 699,670$ km, $\bar{f} = 1999,93$ mm e $d_{px} = 0,0071$ mm. O valor encontrado foi também de aproximadamente 2,42 m.

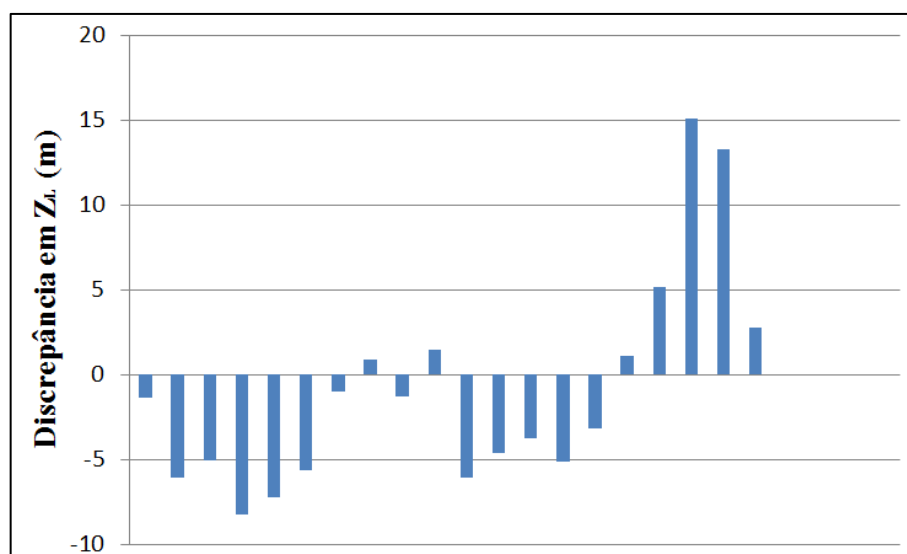


FIGURA 32 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 3.

FONTE: O AUTOR (2015).

A análise visual da Figura 31 permite constatar que há uma ligeira tendência na direção do eixo Y_L no sentido Norte, que pode ser confirmado pelo valor da média das discrepâncias nesta componente (0,5119 m). Constata-se também que 9 dos 20 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada. Também pode ser verificado que na componente Z_L houve uma tendência para valores negativos (média igual a -0,9426 m), e que 14 dos 20 pontos apresentaram-se com discrepância maior do que o valor de exatidão altimétrica esperado.

Adicionalmente à análise gráfica da distribuição das discrepâncias, foi realizado o teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, baseado na distribuição W , para analisar estatisticamente a normalidade das amostras. A um nível de confiança de 95%, apenas na amostra de discrepâncias na componente X_L o valor da estatística W amostral se apresentou maior do que o valor teórico, indicando a não rejeição da hipótese básica. Nas componentes Y_L e Z_L os valores amostrais da estatística W se

apresentaram menores do que os valores teóricos, levando a hipótese básica a ser rejeitada. Tal resultado indica que apenas a amostra de discrepâncias na componente X_L foi considerada proveniente de uma população com distribuição normal. Assim sendo, constata-se que nas discrepâncias das componentes Y_L e Z_L houve possivelmente tendências provenientes de erros sistemáticos não modelados. Os valores das estatísticas W são apresentados na Tabela 29.

TABELA 29 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 3.

Experimento 3		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,945$	$W_{CALC} = 0,893$	$W_{CALC} = 0,855$
$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$

FONTE: O AUTOR (2015).

Uma vez que apenas na componente X_L houve a indicativa de normalidade, com a amostra de discrepâncias desta componente realizou-se o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student*. Este teste teve o objetivo de investigar se o valor da média amostral das discrepâncias na componente X_L pode ser considerado estatisticamente igual à zero. Conforme pode ser visto na Tabela 30, a um nível de confiança de 95%, com o grau de liberdade igual a 19, o valor da estatística t amostral apresentou-se menor do que o valor teórico 2,0930. Assim sendo, a média amostral das discrepâncias na componente X_L pode ser considerada livre de tendência significativa, com 95% de probabilidade.

TABELA 30 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 3.

Experimento 3	
	ΔX_L (m)
$ t $	0,2233
$t_{19;0,975}$	2,0930

FONTE: O AUTOR (2015).

Na análise de exatidão da fototriangulação os valores de REQM das discrepâncias nos pontos de verificação foram analisados. Tais valores são apresentados na Tabela 31.

TABELA 31 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 3.

Experimento 3		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
1,2105	2,1107	6,2132

FONTE: O AUTOR (2015).

Verifica-se a partir da Tabela 31 que os valores das exatidões nas componentes X_L e Y_L apresentaram-se de aproximadamente 1,21 m e 1,94 m respectivamente, sendo iguais a 48% e 84% do valor do GSD. A exatidão na componente altimétrica apresentou-se de aproximadamente 6,21 m.

4.1.4 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 com estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma UCL

Este experimento, denominado aqui de experimento 4, refere-se à fototriangulação das imagens do tripleto 2 com estimativa dos POI das câmeras em órbita. O primeiro objetivo deste experimento foi possibilitar a comparação dos seus resultados com os resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 2 sem a estimativa dos POI em órbita (Experimento 3), a fim de investigar se a consideração da estimativa dos POI em órbita aumentaria a exatidão planialtimétrica. O segundo objetivo foi permitir a comparação com os resultados obtidos a partir da fototriangulação das imagens do tripleto 1 com estimativa dos POI em órbita (Experimento 2).

Da mesma forma que no experimento 2, a análise de significância baseada na comparação do valor do POI com o de seu desvio-padrão foi realizada em etapas. No primeiro ajustamento consideraram-se todos os POI presentes nas Equações (64) e (65). Após treze etapas o conjunto de POI foi definido. Os valores dos POI estimados e de suas precisões são apresentados na Tabela 32.

TABELA 32 – POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 4.

POI		Câmera ré	
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0135	0,0129
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0389	0,0167
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0340	0,0112
$a_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0821	0,0374
$b_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0586	0,0230
$a_{1_matriz5}$	σ	$-3,73 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-4}$
$\delta_{matriz3}$	σ (rad)	$-3,37 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-6}$
$\delta_{matriz4}$	σ (rad)	$2,32 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-6}$
$\delta_{matriz5}$	σ (rad)	$4,45 \times 10^{-6}$	$2,09 \times 10^{-6}$
Δf	σ (mm)	1,8179	1,2565
POI		Câmera nadir	
$a_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0187	0,0139
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0353	0,0118
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0259	0,0068
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0142	0,0058
$\delta_{matriz6}$	σ (rad)	$5,94 \times 10^{-6}$	$4,00 \times 10^{-6}$
Δf	σ (mm)	1,7720	0,6455
POI		Câmera vante	
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0090	0,0370
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0428	0,0107
$a_{0_matriz7}$	σ (mm)	0,0310	0,0281
$b_{0_matriz7}$	σ (mm)	0,0211	0,0069
$a_{0_matriz8}$	σ (mm)	0,0621	0,0549
Δf	σ (mm)	2,1869	0,8180

FONTE: O AUTOR (2015).

Observa-se a partir dos resultados da Tabela 32 que restaram ainda os POI não significantes $a_{1_matriz5}$ da câmera ré, e $a_{0_matriz5}$ da câmera vante. Estes POI se desconsiderados levam a uma piora significativa nas exatidões da fototriangulação nas componentes Y_L e Z_L . Assim sendo, mesmo considerados não significantes os POI citados foram preservados no modelo matemático funcional. Cabe ressaltar que o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ não se alterou de forma significativa ao longo das treze etapas.

De forma análoga ao ocorrido no experimento 2, para todas as três câmeras, quase todos os parâmetros a_0 e b_0 foram considerados significativos, assim como o POI Δf . Os parâmetros a_1 e b_1 de todas as matrizes de CCD e os parâmetros K_1 e K_2 não se mostraram significantes. Porém, o POI $a_{1_matriz5}$ da câmera ré apesar de não significativa mostrou-se importante para a exatidão da fototriangulação, conforme mencionado. Com relação aos parâmetros de flexão das matrizes de CCD, na câmera ré todos foram significantes com exceção do parâmetro da quarta matriz de CCD. Na câmera nadir, apenas o POI $\delta_{matriz6}$ se mostrou significativo, e na câmera vante todos foram considerados não significantes.

Após a análise de significância, as correlações entre os POI foram examinadas (Tabelas 33, 34 e 35), objetivando analisar uma possível simplificação nos modelos matemáticos funcionais.

TABELA 33 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 4.

Câmara ré										
	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	$a_{0_matriz6}$	$b_{0_matriz6}$	$a_{1_matriz5}$	$\delta_{matriz3}$	$\delta_{matriz4}$	$\delta_{matriz5}$	Δf
$b_{0_matriz3}$	1,00									
$a_{0_matriz5}$	-0,15	1,00								
$b_{0_matriz5}$	0,57	0,10	1,00							
$a_{0_matriz6}$	-0,15	0,99	0,10	1,00						
$b_{0_matriz6}$	0,69	0,05	0,88	0,05	1,00					
$a_{1_matriz5}$	0,09	-0,72	-0,05	-0,79	-0,02	1,00				
$\delta_{matriz3}$	0,13	-0,95	-0,11	-0,98	-0,06	0,83	1,00			
$\delta_{matriz4}$	-0,14	0,96	0,09	0,98	0,05	-0,84	-0,99	1,00		
$\delta_{matriz5}$	-0,15	0,89	0,12	0,85	0,06	-0,48	-0,77	0,77	1,00	
Δf	0,13	-0,02	-0,02	-0,02	0,16	0,01	0,03	-0,02	-0,03	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 34 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 4.

Câmara nadir						
	$a_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	$\delta_{matriz6}$	Δf
$a_{0_matriz3}$	1,00					
$b_{0_matriz3}$	0,00	1,00				
$a_{0_matriz5}$	0,55	0,02	1,00			
$b_{0_matriz5}$	0,01	0,29	-0,04	1,00		
$\delta_{matriz6}$	-0,28	-0,04	-0,82	0,06	1,00	

Δf	0,02	-0,25	-0,02	-0,03	0,02	1,00
------------	------	-------	-------	-------	------	------

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 35 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO EXPERIMENTO 4.

Câmara vante						
	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	$a_{0_matriz7}$	$b_{0_matriz7}$	$a_{0_matriz8}$	Δf
$a_{0_matriz5}$	1,00					
$b_{0_matriz5}$	-0,09	1,00				
$a_{0_matriz7}$	0,32	0,01	1,00			
$b_{0_matriz7}$	0,01	-0,51	0,06	1,00		
$a_{0_matriz8}$	0,36	-0,01	0,89	0,00	1,00	
Δf	0,04	-0,28	-0,01	-0,01	0,04	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

A partir da análise sobre as Tabelas 33, 34 e 35 é possível verificar que na câmera ré os pares de POI: $a_{0_matriz5}$ e $a_{0_matriz6}$; $b_{0_matriz5}$ e $b_{0_matriz6}$; $a_{1_matriz5}$ e $a_{0_matriz6}$ se apresentaram fortemente correlacionados. Nesta mesma câmera, observou-se ainda que os POI referentes às flexões das matrizes de CCD apresentaram fortes correlações com os POI $a_{0_matriz5}$, $a_{0_matriz6}$, $a_{1_matriz5}$ e inclusive entre eles próprios. Na câmera nadir houve apenas um caso de forte correlação entre os POI $\delta_{matriz6}$ e $a_{0_matriz5}$ e; na câmera vante também houve apenas um caso, envolvendo os POI $a_{0_matriz7}$ e $a_{0_matriz8}$.

Ao analisar a forte correlação dos POI referentes às flexões das matrizes de CCD com outros POI, inclusive entre eles mesmos, investigou-se a desconsideração dos mesmos a partir da fixação com injeção absoluta com os valores considerados iguais à zero. Procedendo desta forma, considerou-se que os seus efeitos podem ser absorvidos pelos POI que lhes são fortemente correlacionados. Assim sendo, um novo ajustamento foi realizado, no qual se verificou que não houve mudança nem nas exatidões planialtimétricas dos pontos de verificação, nem no valor de $\hat{\sigma}_0^2$. Constatou-se, portanto, que o modelo matemático funcional pôde ser simplificado com a retirada dos POI $\delta_{matriz3}$, $\delta_{matriz4}$ e $\delta_{matriz5}$ na câmera ré e do POI $\delta_{matriz6}$ na câmera nadir.

Tendo em vista ainda as fortes correlações envolvendo os POI a_0 e b_0 mencionadas anteriormente, foi investigado ainda um ajustamento desconsiderando

além dos POI $\delta_{matriz3}$, $\delta_{matriz4}$ e $\delta_{matriz5}$, os POI $a_{0_matriz6}$ e $b_{0_matriz4}$ na câmera ré e o POI $a_{0_matriz8}$ na câmera vante. Como resultado verificou-se uma diminuição da exatidão planialtimétrica. Desta forma, apenas a desconsideração dos POI δ foi adotada.

Em resumo, assim como no experimento 2 com as imagens do triplete 1, os efeitos de rotação (com exceção do POI $a_{1_matriz5}$ na câmera ré) e flexão nas matrizes de CCD nas três câmeras puderam ser desconsiderados sem prejuízo na exatidão da fototriangulação. Também puderam ser desconsiderados os efeitos de mudanças das dimensões dos pixels na direção de y_s e os efeitos das distorções radiais simétricas. Em contrapartida, a maioria dos parâmetros a_0 e b_0 se apresentaram fundamentais para a melhoria da exatidão da fototriangulação em relação ao experimento 3. O conjunto final de POI com seus valores finais após a simplificação dos modelos matemáticos funcionais são apresentados na Tabela 36.

TABELA 36 – POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 4 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.

POI		Câmera ré	
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0135	0,0128
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0389	0,0166
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0340	0,0111
$a_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0821	0,0371
$b_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0586	0,0228
$a_{1_matriz5}$	σ	$-3,73 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-4}$
Δf	σ (mm)	1,8179	1,2470
POI		Câmera nadir	
$a_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0187	0,0138
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0353	0,0117
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0259	0,0067
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0142	0,0057
Δf	σ (mm)	1,7720	0,6407
POI		Câmera vante	
$a_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0090	0,0368
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	-0,0428	0,0106
$a_{0_matriz7}$	σ (mm)	0,0310	0,0279
$b_{0_matriz7}$	σ (mm)	0,0211	0,0068
$a_{0_matriz8}$	σ (mm)	0,0621	0,0545

Δf	σ (mm)	2,1869	0,8118
------------	---------------	--------	--------

FONTE: O AUTOR (2015).

Após o ajustamento das observações final, a precisão do mesmo foi analisada. A Tabela 37 apresenta os resultados. De forma similar ao experimento 3, a precisão das observações considerada foi de 1 pixel (0,0071 mm).

TABELA 37 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 4.

Experimento 4		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 0,8138$		
$\chi_{CALC}^2 = 227,2727$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 219,9720$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 314,1553$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0019	0,0020	0,0012
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0016	0,0013	0,0019

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao analisarem-se os dados da Tabela 37, observa-se que a hipótese nula ($\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$) no teste de hipótese baseado na distribuição do qui-quadrado não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Desta forma, verifica-se que as ponderações e os valores dos resíduos mostraram-se adequados, assim como as REQM das componentes de V para as três imagens, os quais apresentaram-se abaixo do valor da precisão das observações (0,0071 mm). A Tabela 38 apresenta a porcentagem de elementos do vetor V que apresentaram valores menores que o valor do pixel e os valores em módulo de máximo para as componentes x_s e y_s .

TABELA 38 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 4.

Experimento 4					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
$máx(Vx)$	$máx(Vy)$	$máx(Vx)$	$máx(Vy)$	$máx(Vx)$	$máx(Vy)$
0,0069	0,0051	0,0076	0,0032	0,0030	0,0057

99,8% dos valores abaixo de 1 pixel

FONTE: O AUTOR (2015).

Obtidos os valores das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação estimados em relação aos valores extraídos das ortofotos e MDT, os valores de média e desvio-padrão nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram calculados. Os resultados são apresentados na Tabela 39.

TABELA 39 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 4.

Experimento 4			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,1541	-1,2262	-0,3700
σ	0,9394	1,6257	3,6084

FONTE: O AUTOR (2015).

Assim como realizado nos experimentos anteriores, as discrepâncias planimétricas e altimétricas nos pontos de verificação foram analisadas graficamente (Figura 33 e 34). Em concordância com o experimento anterior, a exatidão planimétrica esperada foi de 1 GSD (2,5 m), e a altimétrica foi de 2,42 m.

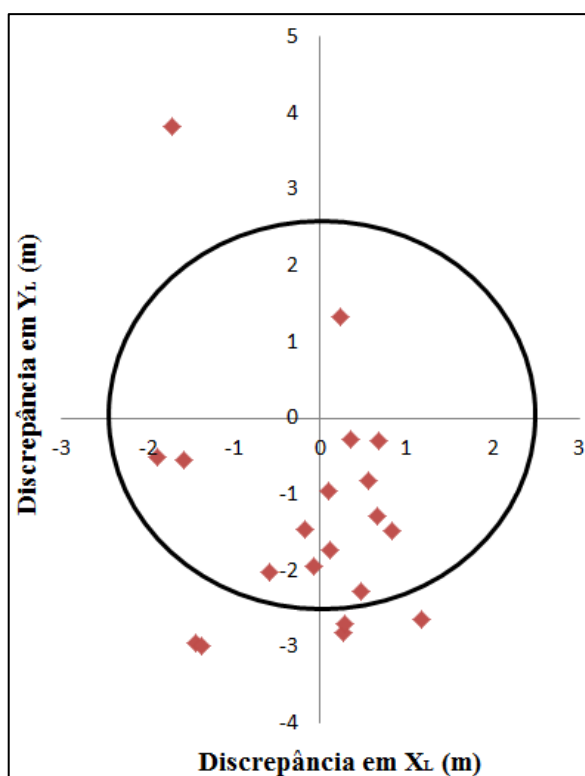


FIGURA 33 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 4.

FONTE: O AUTOR (2015).

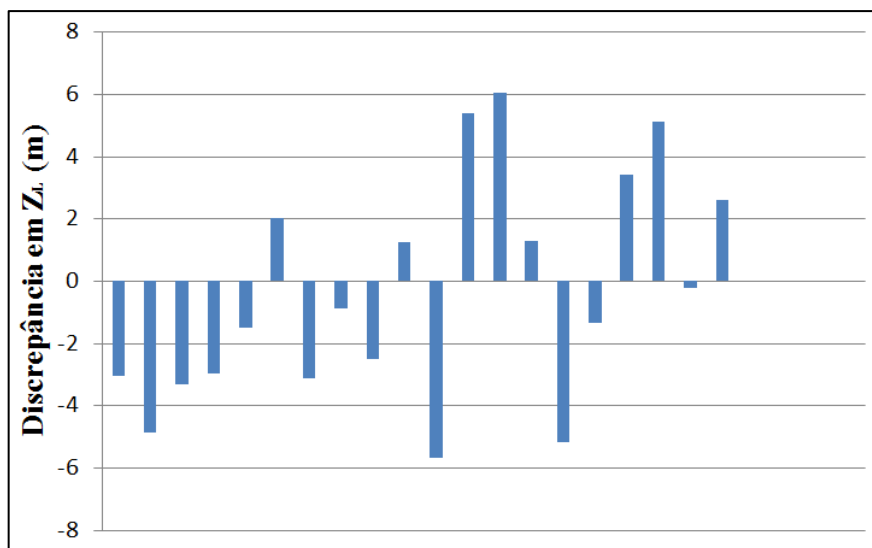


FIGURA 34 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 4.

FONTE: O AUTOR (2015).

A partir da análise visual sobre os comportamentos das discrepâncias planimétricas verifica-se que há uma tendência significativa na componente Y_L , no sentido Sul, a qual pode ser confirmada pelo valor da média na componente Y_L de -1,2262 m. Verifica-se também que 6 dos 20 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada de 2,5 m, três a menos do que no experimento anterior. Com relação à componente altimétrica verifica-se uma ligeira tendência para valores negativos, confirmada pelo valor da média das discrepâncias nesta componente de -0,37 m. Ao comparar-se a distribuição das discrepâncias na componente Z_L obtida neste experimento 4 com a distribuição do experimento 3, verifica-se uma certa melhoria. Outra questão também verificada na componente altimétrica é que 13 dos 20 pontos apresentaram-se com discrepância maior do que o valor de exatidão altimétrica esperado, uma a menos do que no experimento anterior.

No teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, verificou-se que apenas na componente Z_L a hipótese básica não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%, uma vez que o valor amostral da estatística W se apresentou maior do que o valor teórico. Isto indica que, enquanto a distribuição da amostra de discrepâncias na componente Z_L foi considerada normal, as amostras nas componentes X_L e Y_L não o foram, em concordância com o resultado obtido de forma gráfica a partir da Figura

33. Tal resultado pode estar relacionado à presença de erros sistemáticos, mesmo levando em consideração a estimativa dos POI em órbita na fototriangulação. Os valores amostrais e teóricos da estatística W são apresentados na Tabela 40.

TABELA 40 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 4.

Experimento 4		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,882$	$W_{CALC} = 0,841$	$W_{CALC} = 0,947$
$W_{24,0,95} = 0,916$	$W_{24,0,95} = 0,916$	$W_{24,0,95} = 0,916$

FONTE: O AUTOR (2015).

Para investigar a presença de tendência significativa na amostra de discrepâncias da componente Z_L , o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student* foi realizado. A Tabela 41 apresenta o valor amostral da estatística t .

TABELA 41 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 4.

Experimento 4	
	ΔZ_L (m)
$ t $	0,4586
$t_{19;0,975}$	2,0687

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser visto na Tabela 41, o valor da estatística t amostral foi menor do que o valor teórico 2,0687. Assim sendo, a média amostral das discrepâncias na componente Z_L pode ser considerada estatisticamente igual à zero, ao nível de confiança de 95%.

Para verificar a exatidão da fototriangulação, as REQM das discrepâncias dos pontos de verificação foram calculadas. Os resultados são apresentados na Tabela 42.

TABELA 42 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 4.

Experimento 4		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
0,9285	2,0035	3,5364

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado na Tabela 42, os valores de REQM nas componentes X_L e Y_L foram de aproximadamente 0,93 m e 2 m, cerca de 37% e 80% do valor do GSD. Na componente altimétrica o valor de REQM foi de aproximadamente 3,54 m.

Comparando-se os valores de REQM do experimento 4 com os do experimento 3, nota-se uma diminuição dos valores dos mesmos nas componentes X_L e Z_L quando há a estimativa dos POI em órbita na fototriangulação. As melhorias em relação aos valores de REQM do experimento 3 são de aproximadamente 0,28 m, 0,11 m e 2,68 m respectivamente para as componentes X_L , Y_L e Z_L . Na exatidão resultante planimétrica houve uma melhora de quase 0,23 m. No gráfico da Figura 35 são apresentadas as exatidões planimétricas e altimétricas resultantes nos experimentos 3 e 4.

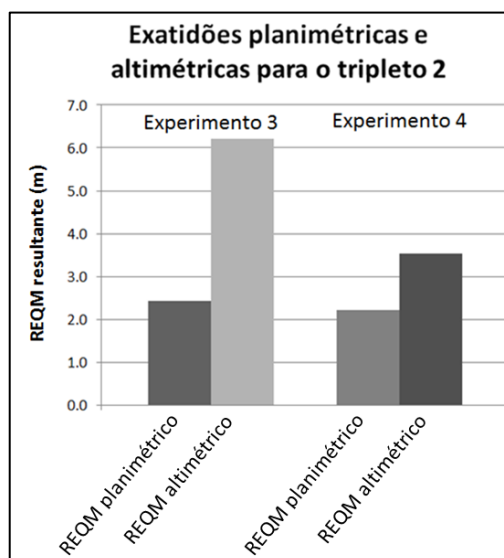


FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 3 E 4.

FONTE: O AUTOR (2015).

Com o conjunto final de POI, conforme realizado no experimento 2, analisou-se as correlações entre os mesmos com o objetivo de investigar a possibilidade de perda de significado físico. Nas Tabelas 43, 44 e 45 são apresentados os valores de coeficientes de correlação para as três câmeras.

TABELA 43 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA RÉ NO EXPERIMENTO 4.

Câmara ré							
	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	$a_{0_matriz6}$	$b_{0_matriz6}$	$a_{1_matriz5}$	Δf
$b_{0_matriz3}$	1,00						
$a_{0_matriz5}$	-0,26	1,00					
$b_{0_matriz5}$	0,54	0,12	1,00				
$a_{0_matriz6}$	-0,26	0,99	0,12	1,00			
$b_{0_matriz6}$	0,67	0,04	0,88	0,04	1,00		
$a_{1_matriz5}$	0,17	-0,79	-0,07	-0,83	-0,02	1,00	
Δf	0,13	-0,04	-0,03	-0,04	0,16	0,03	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 44 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA NADIR NO EXPERIMENTO 4.

Câmara nadir					
	$a_{0_matriz3}$	$b_{0_matriz3}$	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	Δf
$a_{0_matriz3}$	1,00				
$b_{0_matriz3}$	-0,12	1,00			
$a_{0_matriz5}$	0,86	-0,09	1,00		
$b_{0_matriz5}$	-0,05	0,29	-0,07	1,00	
Δf	-0,03	-0,24	-0,04	-0,03	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

TABELA 45 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMERA VANTE NO EXPERIMENTO 4.

Câmara vante						
	$a_{0_matriz5}$	$b_{0_matriz5}$	$a_{0_matriz7}$	$b_{0_matriz7}$	$a_{0_matriz8}$	Δf
$a_{0_matriz5}$	1,00					
$b_{0_matriz5}$	-0,09	1,00				
$a_{0_matriz7}$	-0,96	0,10	1,00			
$b_{0_matriz7}$	-0,10	-0,50	0,12	1,00		

$a_{0_matriz8}$	-0,98	0,09	0,99	0,10	1,00	
Δf	0,06	-0,28	-0,06	-0,02	-0,05	1,00

FONTE: O AUTOR (2015).

Observando os resultados das Tabelas 43, 44 e 45, verifica-se que os valores de coeficientes de correlação se alteraram quase em sua totalidade em relação aos valores apresentados nas Tabelas de 33 a 35. Isto é, com a simplificação dos modelos matemáticos funcionais, a partir da desconsideração dos POI $\delta_{matriz3}$, $\delta_{matriz4}$ e $\delta_{matriz5}$ na câmera ré e do POI $\delta_{matriz6}$ na câmera nadir. Os POI a_0 apresentaram-se fortemente correlacionados entre eles nas três câmeras. Comparando-se com os resultados do experimento 2, nota-se que tal resultado também ocorreu para a câmera ré entre os POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ (Tabela 22). Por outro lado, as correlações entre os POI b_0 nos experimentos 2 e 4 não apresentaram um padrão de semelhança. Para esse experimento (4) apenas na câmera ré os POI $b_{0_matriz5}$ e $b_{0_matriz6}$ se apresentaram fortemente correlacionados e; para o experimento 2 tal resultado ocorreu nas câmeras nadir e vante (Tabelas 23 e 24), além da forte correlação entre o POI $b_{0_matriz1}$ e os POI $b_{0_matriz3}$ e $b_{0_matriz4}$ na câmera vante (Tabela 24).

Conforme realizado no experimento 2, a verificação das correlações entre os POI e os POE também foi efetuada. Na Tabela 46 apresentam-se os valores de coeficientes de correlação.

TABELA 46 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE POI E OS POE NO EXPERIMENTO 4.

Câmera ré											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$b_{0_matriz3}$	-0,01	-0,27	-0,02	0,34	-0,01	0,49	0,23	-0,17	0,25	0,10	-0,09
$a_{0_matriz5}$	-0,01	0,23	-0,01	0,17	-0,01	0,01	-0,93	0,69	-0,99	-0,27	0,51
$b_{0_matriz5}$	-0,02	-0,24	0,02	0,70	0,02	0,71	-0,10	0,08	-0,11	-0,07	0,53
$a_{0_matriz6}$	-0,01	0,23	-0,01	0,16	-0,01	0,01	-0,94	0,70	-0,99	-0,27	0,51
$b_{0_matriz6}$	0,02	-0,23	0,06	0,61	0,01	0,72	-0,02	0,03	-0,04	-0,04	0,31
$a_{1_matriz5}$	0,01	-0,06	0,01	-0,05	0,01	0,00	0,80	-0,59	0,85	0,08	-0,34
Δf	0,28	0,06	-0,51	-0,11	-0,63	-0,14	0,04	-0,03	0,04	0,00	-0,21
Câmera nadir											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$a_{0_matriz3}$	0,02	-0,30	0,02	-0,28	0,02	0,00	0,67	-0,47	0,72	0,30	-0,17

$b_{0_matriz3}$	0,02	-0,03	0,00	0,03	0,00	0,13	-0,09	0,06	-0,11	0,01	0,14
$a_{0_matriz5}$	0,01	-0,43	0,01	-0,41	0,01	0,03	0,47	-0,33	0,51	0,44	-0,10
$b_{0_matriz5}$	0,01	0,11	0,01	0,25	-0,01	0,28	0,05	-0,02	0,05	-0,17	0,13
Δf	0,53	0,15	-0,67	0,03	-0,34	-0,25	0,03	-0,02	0,03	-0,11	0,12
Câmera vante											
	X_T	u_{xT}	Y_T	u_{yT}	Z_T	u_{zT}	ω	φ	κ_0	d_1	d_2
$a_{0_matriz5}$	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	-0,29	-0,97	0,99	-0,97	-0,05	-0,39
$b_{0_matriz5}$	0,03	-0,14	0,00	-0,08	0,01	-0,22	0,09	-0,09	0,08	0,11	0,26
$a_{0_matriz7}$	-0,02	-0,07	-0,02	-0,07	-0,02	0,37	0,95	-0,98	0,95	0,07	0,44
$b_{0_matriz7}$	0,00	-0,18	-0,03	-0,28	-0,01	0,41	0,10	-0,10	0,10	0,23	0,00
$a_{0_matriz8}$	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	0,38	0,96	-0,99	0,97	0,03	0,42
Δf	0,62	0,28	-0,65	0,25	0,06	0,12	-0,05	0,05	-0,05	-0,27	-0,21

Fonte: O autor (2015).

A partir dos dados apresentados na Tabela 46, verifica-se que na câmera ré os POI $a_{0_matriz5}$, $a_{0_matriz6}$ e $a_{1_matriz5}$ apresentaram fortes correlações com os POE ω e κ_0 . Na câmera nadir não houve nenhum caso de forte correlação entre POI e POE. Na câmera vante todos os POI a_0 apresentaram fortes correlações com os POE ω , φ e κ_0 . Ao comparar-se os resultados obtidos com os obtidos no experimento 2, observa-se que as correlações entre os POI a_0 e o ângulo de atitude não físico κ_0 também ocorreu na câmera ré.

Com relação à aplicabilidade dos POI na orientação de outras imagens que não participaram do processo de estimativa dos mesmos, tem-se que todos os POI da câmera nadir podem ser utilizados. Por outro lado, para as câmeras ré e vante, se os POI a_0 e o POI $a_{1_matriz5}$ da câmera ré forem utilizados não haverá garantia de resultados exatos, uma vez que as suas estimativas foram influenciadas pelos ângulos ω , φ e κ_0 , indicando uma provável estimativa local.

4.1.5 Resultados da aplicação dos POI estimados com as imagens do triplete 1 na fototriangulação das imagens do triplete 3 utilizando o modelo de plataforma UCL

Com o objetivo de investigar na prática a usabilidade dos POI estimados na fototriangulação das imagens do triplete 1 (experimento 2), os mesmos foram

utilizados para realizar a orientação interior na fototriangulação das imagens do triplete 3. Este experimento foi denominado aqui de experimento 5. Os resultados foram comparados com os resultados das fototriangulações das imagens do triplete 3 sem e com a estimativa dos POI em órbita, os quais foram denominadas de experimento 5A e 5B.

Após o ajustamento do experimento 5, assim como em todos os experimentos anteriores, a precisão do mesmo foi analisada. Na Tabela 47 são apresentados os resultados. A precisão das observações foi considerada como 1 pixel (0,0071 mm).

TABELA 47 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 5.

Experimento 5		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 1,3253$		
$\chi_{CALC}^2 = 227,2931$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 315,1603$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 318,4935$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0035	0,0041	0,0029
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0053	0,0038	0,0037

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser observado na Tabela 47, a hipótese nula de igualdade entre $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Os valores de REQM dos resíduos das observações apresentaram-se adequados, estando todos abaixo do valor da precisão das observações (0,0071 mm). Adicionalmente, a partir da Tabela 48 pode-se verificar que os valores dos resíduos das observações nas componentes x_s e y_s para as três imagens também se mostraram adequados, tendo em vista que mais de 93% dos valores apresentaram-se menores que um pixel. Os valores máximos dos módulos das componentes x_s e y_s para as três imagens também são apresentados na Tabela 48.

TABELA 48 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 5.

Experimento 5					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
<i>máx</i> ($ V_x $)	<i>máx</i> ($ V_y $)	<i>máx</i> ($ V_x $)	<i>máx</i> ($ V_y $)	<i>máx</i> ($ V_x $)	<i>máx</i> ($ V_y $)
0,0127	0,0113	0,0079	0,0116	0,0093	0,0138
93,13% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

Após a fototriangulação foram calculados as médias e os desvios-padrão das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação estimadas e as coordenadas extraídas das ortofotos e dos MDT. Os valores para as componentes X_L , Y_L e Z_L encontram-se na Tabela 49.

TABELA 49 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 5.

Experimento 5			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	1,2932	-0,1939	1,2339
σ	2,6538	2,3813	3,3998

FONTE: O AUTOR (2015).

Neste experimento 5, semelhantemente ao realizado nos experimentos anteriores, as discrepâncias planimétricas e altimétricas nos pontos de verificação foram analisadas de maneira gráfica, conforme apresentado nas Figuras 36 e 37 respectivamente. Como valor de exatidão planimétrica esperada adotou-se o valor de 1 GSD (2,5 m). O valor de exatidão altimétrica esperado foi calculado a partir da Equação (75), com $h = 691,246$ km, $B = 699,705$ km, $\bar{f} = 1999,93$ mm e $d_{px} = 0,0071$ mm. Seu valor foi de aproximadamente 2,42 m.

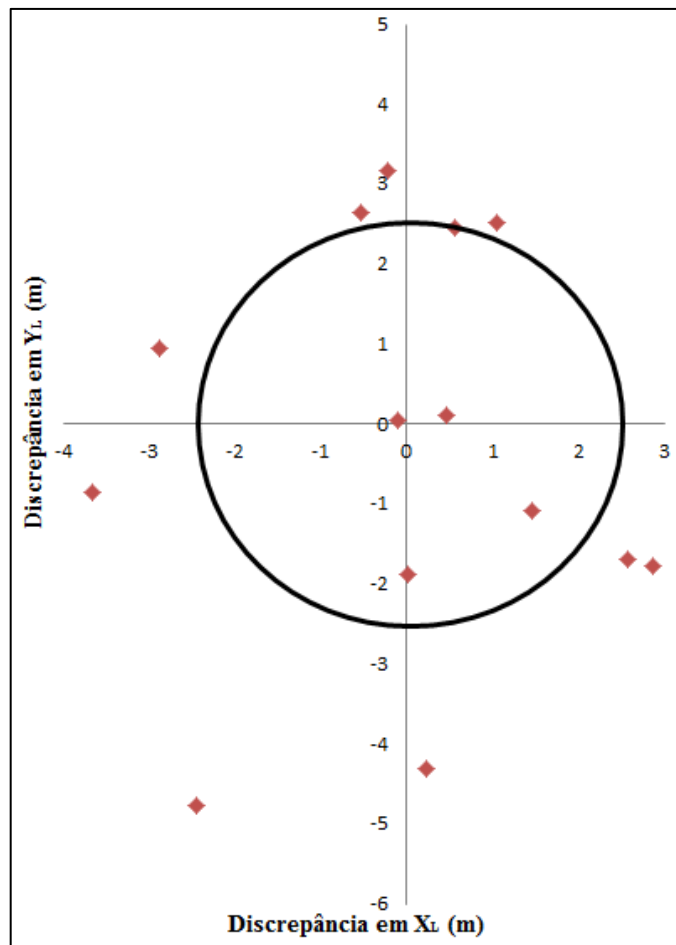


FIGURA 36 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5.

FONTE: O AUTOR (2015).

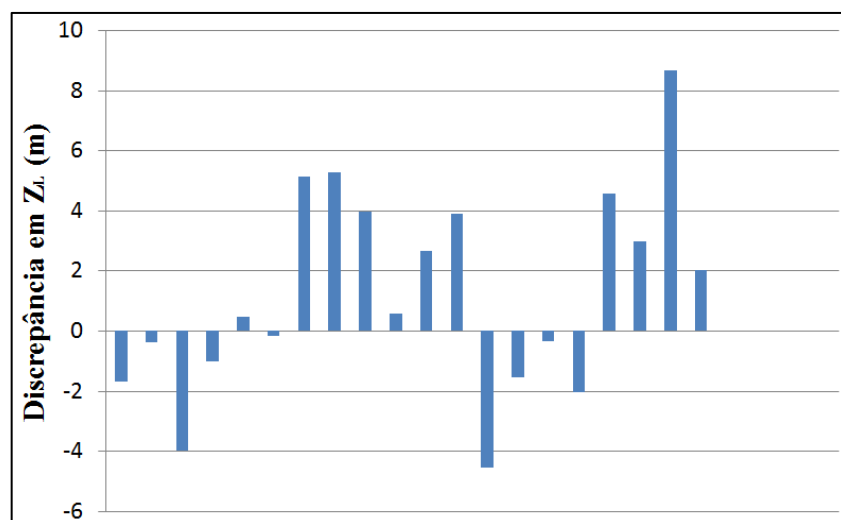


FIGURA 37 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5.

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao analisar os comportamentos das discrepâncias planimétricas observa-se que há uma ligeira tendência no sentido Leste, que pode ser confirmado a partir dos valor da média de 1,29 m na componente X_L (Tabela 49). É possível observar também que apenas 4 dos 20 pontos apresentaram-se menores do que o valor de exatidão planimétrica esperada de 2,5 m. Para a componente altimétrica observa-se também uma certa tendência para valores positivos, conforme também pode ser visto a partir do valor da média na componente Z_L de 1,23 m (Tabela 49). Com relação aos valores, também apenas 4 dos 20 pontos apresentaram-se com discrepância menor do que o valor de exatidão altimétrica esperado.

Complementarmente às análises visuais dos comportamentos das distribuições das discrepâncias, o teste estatístico de normalidade de Shapiro-Wilk foi realizado. Utilizando-se um nível de confiança de 95%, os valores das estatísticas amostrais W foram maiores do que os valores teóricos nas três componentes X_L , Y_L e Z_L , levando a não rejeição das hipóteses básicas de normalidade das amostras. Na Tabela 50 são apresentados os valores das estatísticas W .

TABELA 50 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 5.

Experimento 5		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,957$	$W_{CALC} = 0,958$	$W_{CALC} = 0,974$
$W_{20,0,05} = 0,905$	$W_{20,0,05} = 0,905$	$W_{20,0,05} = 0,905$

FONTE: O AUTOR (2015).

Verificada a normalidade nas amostras de discrepâncias, utilizou-se o teste de hipótese t de *student* para verificar se as médias amostrais podem ser estatisticamente consideradas iguais à zero, isto é, isentas de tendências significativas. Na Tabela 51 são apresentados os valores das estatísticas t .

TABELA 51 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 5.

Experimento 5			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
$ t $	2,4286	0,3642	1,6231
$t_{19;0,975}$	2,0930	2,0930	2,0930

FONTE: O AUTOR (2015).

Com um grau de liberdade igual a 19 e um nível de confiança de 95%, o valor da estatística t teórica foi de 2,0930. Tendo em vista que nas componentes Y_L e Z_L os valores de t amostrais mostraram-se abaixo do valor teórico, as hipóteses básicas não foram rejeitadas, e as médias amostrais das discrepâncias nestas componentes foram consideradas estatisticamente iguais à zero a um nível de confiança de 95%. Por outro lado, a hipótese básica na componente X_L foi rejeitada, uma vez que o valor da estatística t amostral se apresentou maior do que o valor teórico tabelado. Isto indica que na amostra desta componente há presença de erros sistemáticos remanescentes não modelados. Tais erros podem estar relacionados com a utilização dos POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ da câmera ré do triplete 1 os quais apresentaram fortes correlações com o ângulo κ_0 .

Na análise da exatidão da fototriangulação do experimento 5, os valores de REQM das discrepâncias nos pontos de verificação para as componentes X_L , Y_L e Z_L foram obtidos. Estes valores são apresentados na Tabela 52.

TABELA 52 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 5.

Experimento 5		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
2,8918	2,3291	3,5359

FONTE: O AUTOR (2015).

Observa-se a partir da Tabela 52 que as exatidões nas componentes X_L e Y_L apresentaram-se de aproximadamente 2,89 m e 2,32 m respectivamente, o que representa cerca de 116% e 93% do valor do GSD. Na componente altimétrica a exatidão foi de aproximadamente 3,54 m. Conforme pode ser visto, apesar dos POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ da câmera ré do triplete 1 terem apresentado fortes

correlações com o ângulo κ_0 , indicando uma possível estimativa local, a aplicação prática destes POI na câmera ré do tripleto 3 se mostrou viável.

Posteriormente a fototriangulação das imagens do tripleto 3 utilizando os POI provenientes do experimento 2, realizou-se as fototriangulações das imagens do tripleto 3, sem e com a estimativa dos POI em órbita (experimentos 5A e 5B). Assim como nos experimentos 2 e 4, na fototriangulação com estimativa dos POI em órbita foram realizadas as análises de significância dos POI e de correlações entre os mesmos. Após estas etapas, os modelos matemáticos funcionais foram simplificados e o grupo final de POI foi definido. A fim de verificar as precisões dos ajustamentos nos dois experimentos, foram analisados os valores das REQM dos vetores dos resíduos e os resultados dos testes de hipótese utilizando a distribuição Qui-quadrado sobre as igualdades dos fatores de variância da unidade de peso *a priori* e *a posteriori*. Os resultados encontram-se na Tabela 53.

TABELA 53 – RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS NOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.

Experimento 5A			Experimento 5B		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 1,1003$			$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 0,9761$		
$\chi_{CALC}^2 = 298,1896$			$\chi_{CALC}^2 = 264,5361$		
$\chi_{gl;0,025}^2 = 227,2931$			$\chi_{gl;0,025}^2 = 224,5465$		
$\chi_{gl;0,975}^2 = 318,4935$			$\chi_{gl;0,975}^2 = 318,4935$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante	Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0019	0,0020	0,0015	0,0024	0,0024	0,0020
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0047	0,0027	0,0031	0,0041	0,0027	0,0030

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado na Tabela 53, em ambos os ajustamentos as hipótese básicas de igualdade entre $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 não foram rejeitadas ao nível de confiança de 95%. Também em ambos os ajustamentos todos os valores de REQM dos resíduos para as seis imagens apresentaram-se com valor abaixo do valor da precisão das observações (0,0071 mm). Com relação aos valores dos resíduos,

conforme mostrado na Tabela 54, no experimento 5A, 98,28% dos valores apresentaram-se abaixo do valor de um pixel e no experimento 5B a porcentagem foi de 97,85%. Os valores máximos dos módulos das componentes x_s e y_s para as três imagens do experimento 5A e para as três imagens do experimento 5B também são apresentados na Tabela 54.

TABELA 54 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGENS DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA OS EXPERIMENTOS 5A E 5B.

Experimento 5A					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
$máx (Vx)$	$máx (Vy)$	$máx (Vx)$	$máx (Vy)$	$máx (Vx)$	$máx (Vy)$
0,0062	0,0097	0,0064	0,0140	0,0042	0,0153
98,28% dos valores abaixo de 1 pixel					
Experimento 5B					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
$máx (Vx)$	$máx (Vy)$	$máx (Vx)$	$máx (Vy)$	$máx (Vx)$	$máx (Vy)$
0,0073	0,0084	0,0098	0,0131	0,0085	0,0140
97,85% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

Depois de realizadas as fototriangulações dos experimentos 5A e 5B realizadas, calcularam-se as médias e os desvios-padrão das discrepâncias calculadas entre as coordenadas dos pontos de verificação estimadas e as coordenadas extraídas das ortofotos e dos MDT. Os valores encontram-se na Tabela 55.

TABELA 55 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 5A.

Experimento 5A				Experimento 5B			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)		ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,2936	-1,5743	1,9034	μ	0,7638	0,2385	2,0160
σ	2,8344	1,8043	3,6668	σ	1,8261	2,3637	3,1032

FONTE: O AUTOR (2015).

Com o objetivo de analisar visualmente os comportamentos das discrepâncias planimétricas e altimétricas nos dois experimentos, as mesmas foram

plotadas nos gráficos que são apresentados nas Figuras 38 e 39. Em concordância com o utilizado no experimento 5, os valores de exatidões planimétricas e altimétricas esperados foram de 2,5 m e 2,42 m respectivamente.

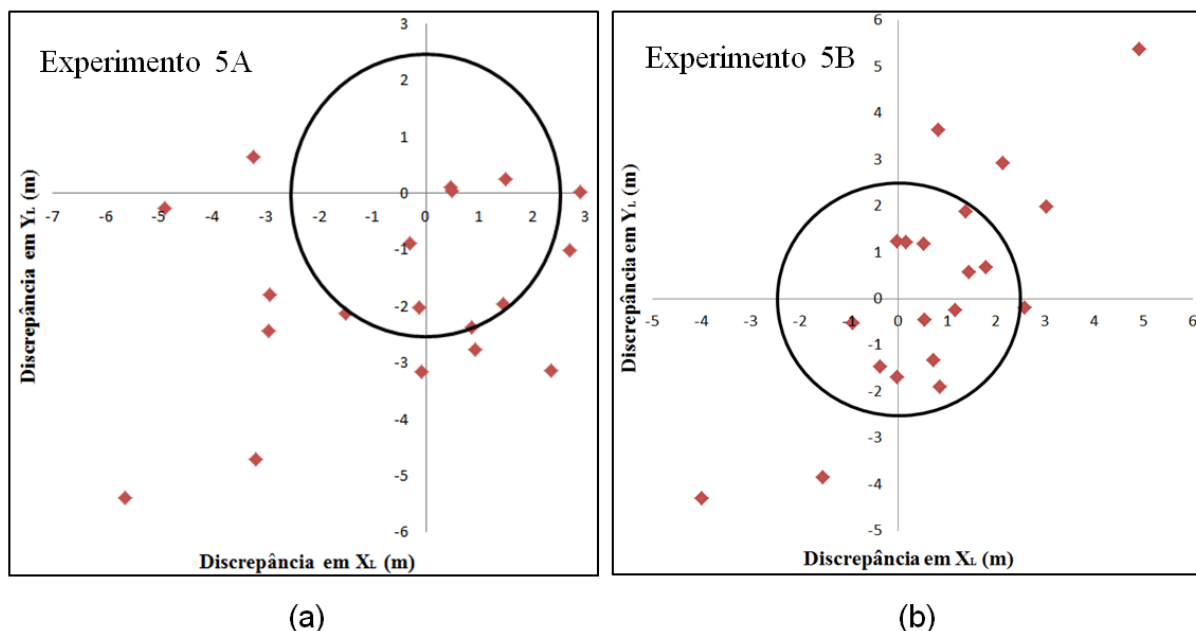


FIGURA 38 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5A (a) E PARA O EXPERIMENTO 5B (b).

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 38, nas discrepâncias planimétricas do experimento 5A há uma tendência na direção do eixo Y_L para o sentido Sul. Esta tendência é confirmada pelo valor da média das discrepâncias nesta componente de -1,5743 m. Já nas discrepâncias planimétricas do experimento 5B verifica-se uma ligeira tendência na direção do eixo X_L , no sentido Este, a qual pode ser confirmada pelo valor da média das discrepâncias nesta componente de 0,7638 m. Observa-se também que no Experimento 5A 14 dos 20 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada de 2,5 m. Já no experimento 5B apenas 7 pontos apresentaram-se maiores do que o valor de exatidão planimétrica esperada, isto é, sete a menos do que o experimento sem a estimativa dos POI em órbita.

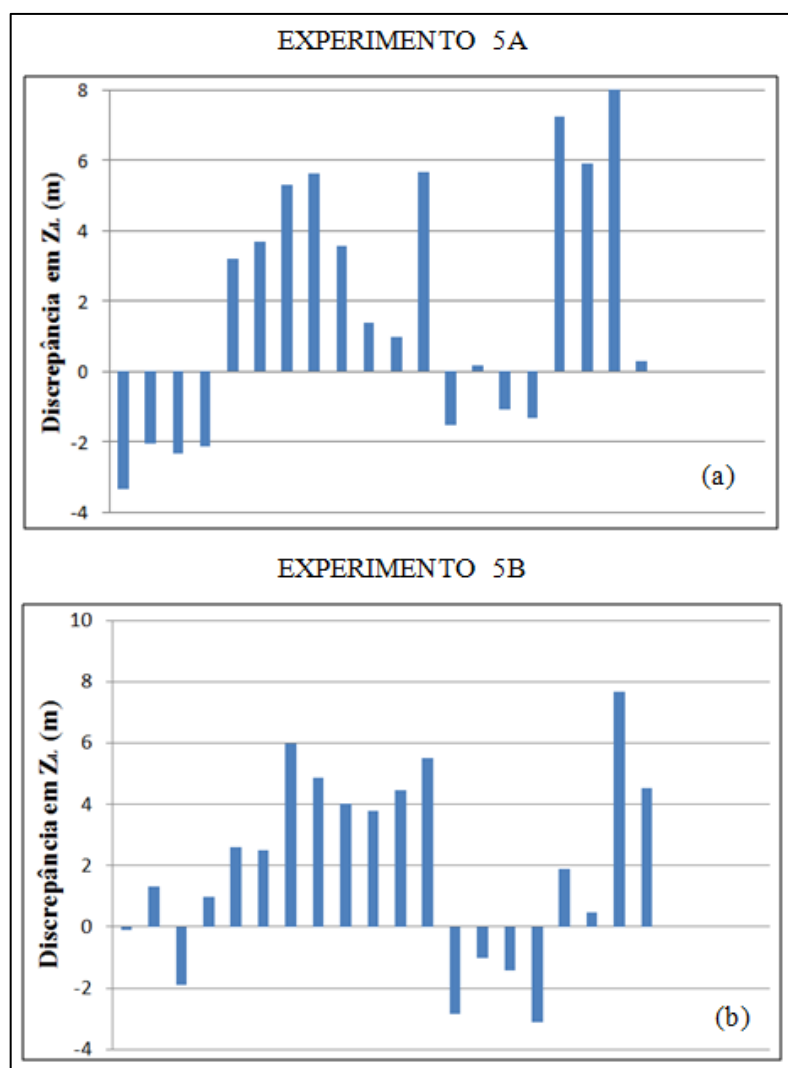


FIGURA 39 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO PARA O EXPERIMENTO 5A (a) E PARA O EXPERIMENTO 5B (b).

FONTE: O AUTOR (2015).

Com relação à parte altimétrica, verifica-se a partir das análises visuais das discrepâncias nos dois experimentos que há uma tendência para valores positivos. Estas tendências podem ser confirmadas pelos valores das médias nas componentes Z_L de 1,9034 m e 2,0160 m.

A fim de complementar as análises gráficas das distribuições das discrepâncias, utilizou-se o teste estatístico de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das amostras. Conforme pode ser visto na Tabela 56, com nível de confiança de 95% todas as amostras das componentes X_L , Y_L e Z_L , nos dois experimentos, foram consideradas com distribuição normal. Isto tendo em vista que

os valores amostrais das estatísticas W se apresentaram menores do que os valores teóricos tabelados.

TABELA 56 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NOS TESTES DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.

Experimento 5A		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,970$	$W_{CALC} = 0,968$	$W_{CALC} = 0,937$
$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$
Experimento 5B		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,935$	$W_{CALC} = 0,984$	$W_{CALC} = 0,970$
$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$	$W_{20,0,95} = 0,905$

FONTE: O AUTOR (2015).

Para investigar se os valores das médias amostrais das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L podem ser considerados como sendo estatisticamente iguais à zero, isto é, isentas de tendências significativas, o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student* foi realizado. Na Tabela 57 são apresentados os valores das estatísticas t .

TABELA 57 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.

Experimento 5A				Experimento 5B		
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
$ t $	0,4632	3,9020	2,3215	1,8707	0,4514	2,9054
$t_{21;0,975}$	2,0930	2,0930	2,0930	2,0930	2,0930	2,0930

FONTE: O AUTOR (2015).

Os valores teóricos da estatística t foram iguais a 2,0930, uma vez que o grau de liberdade foi de 19 e o nível de confiança foi de 95%. Para o experimento 5A, somente na componente X_L a hipótese básica não foi rejeitada, tendo em vista que o valor amostral da estatística t se apresentou menor do que o valor teórico. Isto indica que as médias amostrais nas componentes Y_L e Z_L não podem ser consideradas estatisticamente iguais à zero. Isto por conta de possíveis influências de erros sistemáticos não modelados. Já no caso do experimento 5B somente na

componente Z_L a hipótese básica foi rejeitada, uma vez que o valor amostral da estatística t se apresentou maior do que o valor teórico. Pode-se constatar diante de tal resultado que parte dos erros sistemáticos presentes na fototriangulação sem estimativa dos POI em órbita foi minimizada com a estimativa dos mesmos em órbita. De forma semelhante ao ocorrido no experimento 2, restou ainda uma parcela de erros sistemáticos na componente Z_L não modelada.

A fim de verificar a exatidão das fototriangulações nos experimentos, foram calculadas as REQM das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação estimadas e extraídas das ortofotos e MDT. Na Tabela 58 são apresentados os valores de REQM das componentes planimétricas e altimétricas para os dois experimentos.

TABELA 58 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DOS EXPERIMENTOS 5A E 5B.

Experimento 5A			Experimento 5B		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)	REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
2,8500	2,1704	5,4814	1,9368	2,3162	3,6349

FONTE: O AUTOR (2015).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 58, verifica-se que no experimento 5A os valores de REQM nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram de aproximadamente 2,85 m, 2,17 m e 5,48 m respectivamente. Já no experimento 5B os valores de REQM nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram de aproximadamente 1,94 m, 2,32 m e 3,63 m respectivamente. Comparando-se os resultados, tem-se que a fototriangulação das imagens do tripleto 3 com estimativa dos POI em órbita proporcionou melhorias nas componentes X_L e Z_L de aproximadamente 0,91 m e 1,85 m respectivamente. Por outro lado, na componente Y_L houve um decréscimo da exatidão de 0,15 m. Porém, mesmo com este decréscimo, a exatidão planimétrica resultante apresentou uma melhora de 0,56 m, conforme pode ser visualizado na Figura 40.

Comparando-se os resultados do experimento 5 com os resultados do experimento 5A, verifica-se que a fototriangulação com os POI estimados a partir das imagens do tripleto 1 apresentou ligeiras pioras de 0,04 m e 0,16 m nas exatidões em relação à fototriangulação sem estimativa dos POI em órbita, respectivamente nas componentes X_L e Y_L .

Comparando-se ainda os resultados do experimento 5 com os resultados do experimento 5B, tem-se que a fototriangulação com os POI estimados no tripleto 1 apresentou uma exatidão planimétrica resultante menor (0,69 m) do que a fototriangulação das imagens do tripleto 3 com a estimativa dos POI em órbita. Por outro lado, na componente altimétrica a fototriangulação das imagens do tripleto 3 com a estimativa dos POI em órbita apresentou resultado ligeiramente menos exato (0,10 m) do que o da fototriangulação com os POI estimados no tripleto 1. Na Figura 40 são apresentados graficamente os valores de REQM planimétricos e altimétricos resultantes obtidos nos experimentos 5, 5A e 5B.

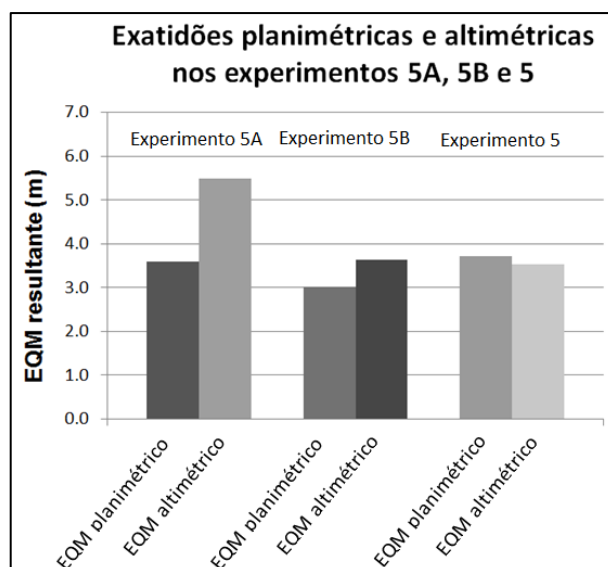


FIGURA 40 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 5, 5A E 5B.

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pôde ser visto nos experimentos, quando se realiza a fototriangulação com a estimativa dos POI em órbita há uma melhoria nas exatidões planimétricas e altimétricas resultantes. As melhorias planimétricas resultantes nos experimentos 2, 4 e 5B foram da ordem de decímetros, com valores de aproximadamente 0,65 m, 0,23 m e 0,56 m respectivamente para os experimentos citados. Por outro lado na componente altimétrica as melhorias de exatidão foram mais significativas, alcançando valores de aproximadamente 1,36 m, 2,68 m e 1,85 m respectivamente para os experimentos 2, 4 e 5B.

Pôde-se verificar também que o uso dos POI estimados com as imagens do tripleto 1 para a orientação interior, na fototriangulação das imagens do tripleto 3, propôs resultados menos exatos planimetricamente em relação ao resultados provenientes da fototriangulação das imagens do tripleto 3 com estimativa dos POI em órbita. Na componente altimétrica os resultados foram próximos. Desta forma, indica-se optar por utilizar de forma direta a fototriangulação das imagens com a estimativa dos POI em órbita, realizando a análise do conjunto mais adequado de POI a ser utilizado.

4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS UTILIZANDO O MODELO DE PLATAFORMA J2

4.2.1 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2

A fototriangulação das imagens do tripleto 1 sem a estimativa dos POI em órbita, utilizando o modelo de plataforma J2, foi denominado de experimento 6. O objetivo deste experimento foi de permitir a comparação entre os resultados de exatidão planialtimétrica obtidos e os resultados do experimento de fototriangulação com estimativa dos POI em órbita. Realizado o ajustamento, analisou-se a precisão do mesmo. Na Tabela 59 são apresentados os resultados.

TABELA 59 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 6.

Experimento 6		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0840$		
$\chi_{CALC}^2 = 313,2802$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 243,8012$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 337,9855$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0022	0,0027	0,0028
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0028	0,0029	0,0040

FONTE: O AUTOR (2015).

Verifica-se a partir dos resultados apresentados na Tabela 59 que a hipótese nula no teste de hipótese de igualdade entre $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 não foi rejeitada a um nível de confiança de 95%. Verifica-se também que os valores das REQM dos vetores dos resíduos das observações apresentaram-se menores que o valor da precisão das observações de 0,0071 mm, sendo, portanto considerados adequados. Com relação aos valores dos resíduos nas componentes x_s e y_s para as três imagens, os mesmos se mostraram também adequados. Isto tendo em vista que ao considerar o conjunto total de resíduos para as três imagens, mais de 98% dos valores se apresentaram menores que o valor de 1 pixel, conforme apresentado na Tabela 60. Os valores máximos dos módulos das componentes x_s e y_s dos resíduos para as três imagens também são apresentados na Tabela 60.

TABELA 60 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 6.

Experimento 6					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)	<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)	<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)
0,0068	0,0116	0,0091	0,0159	0,0110	0,0092
98,19% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

Após a fototriangulação, as médias e desvios-padrão das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação estimados nos ajustamentos e as coordenadas extraídas das ortofotos e MDT foram calculados. Na Tabela 61 são apresentados os valores para as três componentes do SGL.

TABELA 61 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 6.

Experimento 6			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,0775	-0,0035	-3,3002
σ	1,5135	1,8712	4,0032

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser observado, os valores apresentados na Tabela 61 são praticamente iguais aos apresentados na Tabela 8. De forma análoga, todas as

análises realizadas sobre as distribuições gráficas das discrepâncias planimétricas e altimétricas são praticamente as mesmas das apresentadas no experimento 1, baseadas nos gráficos das Figuras 26 e 27.

Com o objetivo de complementar as análises obtidas sobre os gráficos, as normalidades nas amostras das discrepâncias foram verificadas a partir do teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, baseado na distribuição W . Conforme pode ser observado na Tabela 62, definindo-se um nível de confiança de 95%, as hipóteses básicas nas componentes X_L e Z_L não foram rejeitadas, uma vez que os valores amostrais da estatística W se apresentaram menores do que os valores teóricos tabelados. Consequentemente, as amostras de discrepâncias nestas componentes citadas podem ser consideradas com distribuição normal. Por outro lado, na componente Y_L o valor amostral da estatística W se apresentou menor do que o valor teórico tabelado, levando a rejeição da hipótese básica e a indicação de que a amostra nesta componente não apresenta uma distribuição normal. Observa-se também que os valores contidos na Tabela 62 são praticamente idênticos aos apresentados na Tabela 9.

TABELA 62 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 6.

Experimento 6		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,972$	$W_{CALC} = 0,903$	$W_{CALC} = 0,941$
$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$

FONTE: O AUTOR (2015).

No teste de verificação de tendências significativas, conforme pode ser observado na Tabela 63, o valor amostral da estatística t na componente X_L se apresentou menor do que o valor teórico, apontando que a hipótese básica não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Por outro lado, na componente Z_L o valor de t amostral apresentou-se maior do que o valor teórico, indicando a rejeição da hipótese básica. Estes resultados indicam que apenas na componente X_L a média amostral da discrepância pode ser considerada estatisticamente igual à zero.

TABELA 63 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 6.

Experimento 6		
	ΔX_L (m)	ΔZ_L (m)
$ t $	0,2404	3,8717
$t_{21;0,975}$	2,0796	2,0796

FONTE: O AUTOR (2015).

Para a análise das exatidões, as REQM das discrepâncias planialtimétricas entre as coordenadas dos pontos de verificação estimados e as coordenadas extraídas das ortofotos e MDT foram calculados. Os resultados são apresentados na Tabela 64.

TABELA 64 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 6.

Experimento 6		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
1,4807	1,8282	5,1175

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser observado na Tabela 64, os valores de REQM nas componentes X_L e Y_L apresentaram-se de aproximadamente 1,48 m e 1,83 m respectivamente, correspondendo a cerca de 59% e 73% do valor do GSD. A REQM da componente altimétrica apresentou-se de aproximadamente 5,12 m. Comparando-se os resultados de REQM obtidos neste experimento com os obtidos no Experimento 1, ou seja, com o uso do modelo de plataforma UCL, verifica-se que as diferenças apresentaram-se na ordem do milímetro. Isto indica que a aceleração adicional da atração gravitacional da Terra devido ao seu achatamento polar no modelo de plataforma não apresentou influência significativa nos resultados.

4.2.2 Resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 1 com estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2

O experimento denominado aqui de experimento 7, refere-se à realização da fototriangulação com a estimativa dos POI em órbita das imagens do tripleto 1. Este experimento foi realizado a fim de comparar os seus resultados com os resultados da fototriangulação das mesmas imagens sem a estimativa dos POI em órbita (experimento 6).

Após a análise de significância dos POI em etapas realizou-se a análise de correlação entre os POI objetivando a simplificação dos modelos matemáticos funcionais. Verificou-se que os valores dos POI, os POI não significantes e os pares de POI fortemente correlacionados foram os mesmos do experimento 2. Apresentam-se na Tabela 65 os valores do conjunto final de POI definidos para as três câmeras.

TABELA 65 – POI DAS CÂMERAS RÉ, NADIR E VANTE COM SUAS INCERTEZAS NO EXPERIMENTO 7 APÓS A SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS FUNCIONAIS.

POI		Câmera ré	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	-0,0386	0,0167
$b_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0688	0,0159
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0120	0,0058
$a_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0145	0,0097
Δf	σ (mm)	2,1501	1,7129
POI		Câmera nadir	
$a_{0_matriz1}$	σ (mm)	0,0281	0,0077
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0247	0,0129
$b_{0_matriz4}$	σ (mm)	0,0637	0,0289
Δf	σ (mm)	2,4863	1,3105
POI		Câmera vante	
$a_{0_matriz3}$	σ (mm)	0,0506	0,0087
$b_{0_matriz3}$	σ (mm)	-0,0301	0,0127
$b_{0_matriz5}$	σ (mm)	0,0327	0,0142
$b_{0_matriz6}$	σ (mm)	0,0642	0,0271
Δf	σ (mm)	1,7388	1,2199

FONTE: O AUTOR (2015).

A análise da precisão do ajustamento foi realizada da mesma forma que nos experimentos anteriores. Os resultados são apresentados na Tabela 66.

TABELA 66 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO NO EXPERIMENTO 7.

Experimento 7		
$\sigma_0^2 = 1$, $\hat{\sigma}_0^2 = 0,9244$		
$\chi_{CALC}^2 = 267,1591$, $\chi_{gl;0,025}^2 = 242,8828$, $\chi_{gl;0,975}^2 = 337,9855$		
Imagem ré	Imagem nadir	Imagem vante
REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)	REQM Vx (mm)
0,0022	0,0025	0,0025
REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)	REQM Vy (mm)
0,0027	0,0026	0,0038

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado, no teste de hipótese de igualdade entre $\hat{\sigma}_0^2$ e σ_0^2 , a hipótese nula não foi rejeitada ao nível de confiança de 95%. Assim como no experimento 2, os valores de REQM dos vetores dos resíduos das observações, bem como os próprios valores dos resíduos nas componentes x_s e y_s apresentaram-se adequados. Na Tabela 67 são apresentados os valores máximos dos módulos das componentes x_s e y_s dos resíduos para as três imagens, bem como a porcentagem de valores abaixo do valor de 1 pixel, considerando o conjunto total dos resíduos.

TABELA 67 – VALORES DE RESÍDUOS MÁXIMOS NAS COMPONENTES E PORCENTAGEM DE RESÍDUOS ABAIXO DE 1 PIXEL PARA O EXPERIMENTO 7.

Experimento 7					
Imagem ré		Imagem nadir		Imagem vante	
<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)	<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)	<i>máx</i> ($ Vx $)	<i>máx</i> ($ Vy $)
0,0082	0,0126	0,0082	0,0130	0,0088	0,0071
98,39% dos valores abaixo de 1 pixel					

FONTE: O AUTOR (2015).

Da mesma forma que nos experimentos anteriores, a partir das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação estimadas no ajustamento e extraídas das ortofotos e dos MDT, foram calculadas as médias e os

desvios-padrão para as componentes X_L , Y_L e Z_L . Os resultados são apresentados na Tabela 68.

TABELA 68 – VALORES DE MÉDIAS E DESVIOS-PADRÃO DAS DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO EXPERIMENTO 7.

Experimento 7			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
μ	-0,2708	-0,4273	-1,5862
σ	1,2362	1,1136	3,4864

FONTE: O AUTOR (2015).

Assim como no experimento anterior, pode-se observar que os valores apresentados na Tabela 68 de médias e desvios-padrão são praticamente iguais aos apresentados na Tabela 18. Da mesma forma, as análises decorrentes das verificações realizadas sobre as distribuições gráficas das discrepâncias planimétricas e altimétricas são também praticamente as mesmas das apresentadas no experimento 2, a partir dos gráficos das Figuras 28 e 29.

No teste de hipótese de *Shapiro-Wilk*, nas três componentes os valores amostrais da estatística W se apresentaram acima dos valores teóricos (Tabela 69). Assim sendo, tem-se que as amostras de discrepâncias nas três componentes foram consideradas com distribuição normal, a um nível de confiança de 95%.

TABELA 69 – VALORES AMOSTRAL E TEÓRICO DAS ESTATÍSTICAS W NO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK NO EXPERIMENTO 7.

Experimento 7		
Componente X_L	Componente Y_L	Componente Z_L
$W_{CALC} = 0,973$	$W_{CALC} = 0,964$	$W_{CALC} = 0,919$
$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$	$W_{22,0,95} = 0,911$

FONTE: O AUTOR (2015).

A fim de investigar se os valores das médias amostrais das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L podem ser considerados livres de tendências significativas, isto é, como sendo estatisticamente iguais à zero, o teste de hipótese baseado na distribuição t de *student* foi realizado. Na Tabela 70 são apresentados os valores das estatísticas t .

TABELA 70 – ESTATÍSTICAS t AMOSTRAIS DAS DISCREPÂNCIAS EM X_L , Y_L E Z_L NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO EXPERIMENTO 7.

Experimento 7			
	ΔX_L (m)	ΔY_L (m)	ΔZ_L (m)
t	1,0274	1,7997	2,1340
$t_{21;0,975}$	2,0796	2,0796	2,0796

FONTE: O AUTOR (2015).

Tendo em vista que os valores de t amostrais nas componentes X_L e Y_L apresentaram-se abaixo do valor teórico, as médias amostrais das discrepâncias nestas componentes podem ser consideradas estatisticamente iguais à zero, a um nível de confiança de 95%. Por outro lado, na componente Z_L o valor amostral da estatística t apresentou-se acima do valor teórico tabelado, levando à rejeição da hipótese básica e indicando a presença de tendência significativa. Assim como no experimento 2, é possível que se verifique a presença de erros sistemáticos remanescentes nesta componente altimétrica.

Com o objetivo de analisar a exatidão da fototriangulação as REQM das discrepâncias nas componentes X_L , Y_L e Z_L foram calculados. Na Tabela 71 são apresentados os resultados.

TABELA 71 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS DO EXPERIMENTO 7.

Experimento 7		
REQM X_L (m)	REQM Y_L (m)	REQM Z_L (m)
1,2378	1,1688	3,7575

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado, os valores de REQM nas componentes planimétricas X_L e Y_L apresentaram-se de aproximadamente 1,24 m e 1,17 m respectivamente. Na componente Z_L o valor foi de aproximadamente 3,76 m. Comparando-se os valores de REQM com os valores de REQM obtidos no experimento 2 verifica-se que os mesmos são praticamente iguais, com discordância máxima ao nível do milímetro. Similarmente ao ocorrido com o experimento 6, tem-se que a consideração da aceleração proporcionada pela atração gravitacional da Terra devido ao seu achatamento polar não influenciou de maneira significativa os resultados. Ao compararem-se os valores de REQM da Tabela 71 com os valores de

REQM do experimento 6, verifica-se que a fototriangulação com estimativa dos POI em órbita apresentou melhorias de exatidão de 0,24 m, 0,66 m e 1,36 m nas componentes X_L , Y_L e Z_L respectivamente. Na resultante planimétrica a melhoria em exatidão resultante foi de 0,65 m.

De forma similar ao realizado no experimento 2, as correlações entre os POI também foram analisadas com o objetivo de investigar se os valores estimados apresentam ou não significado físico. Comparando-se os valores de coeficientes de correlação calculados com os valores obtidos no experimento 2 (Tabelas 22, 23 e 24), verificou-se que a maior diferença foi da ordem de grandeza de 10^{-4} . Neste caso, os valores foram considerados iguais aos apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24 para as três câmeras. Cabe ressaltar que os valores dos POI que apresentaram fortes correlações com pelo menos um outro POI perderam os seus significados físicos.

As ocorrências de correlação entre os POI e os POE também foram investigadas, objetivando-se verificar alguma possível influência dos POE nas estimativas dos POI. Assim como ocorrido nas correlações entre os POI, os valores calculados de coeficientes de correlação entre os POI e os POE apresentaram-se praticamente idênticos aos calculados no experimento 2, apresentados na Tabela 25. Desta forma, tem-se que nenhum dos POI das câmeras nadir e vante apresentaram forte correlação com qualquer POE. Para a câmera ré os POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ apresentaram forte correlação com o POE κ_0 .

4.2.3 Resultados dos demais experimentos de fototriangulações utilizando o modelo de plataforma J2

Conforme pôde ser verificado nos experimentos 6 e 7, a consideração da aceleração proporcionada pela atração gravitacional da Terra devido ao seu achatamento polar não influenciou de maneira significativa os resultados. Assim sendo, uma vez que em todos os demais experimentos verificaram-se resultados praticamente iguais aos respectivos experimentos utilizando o modelo de plataforma UCL, indica-se a seguir somente de forma gráfica, a partir da Figura 41, os valores

de REQM resultantes planimétricos e altimétricos para fins de comparação. No gráfico apresentado na Figura 41, os experimentos 8 e 9 tratam respectivamente da fototriangulação das imagens do triplo 2 sem e com a estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2; o experimento 10 trata da fototriangulação das imagens do triplo 3 utilizando os POI estimados no triplo 1 para a realização da orientação interior e; os experimentos 10A e 10B tratam respectivamente da fototriangulação das imagens do triplo 3 sem e com a estimativa dos POI em órbita utilizando o modelo de plataforma J2.

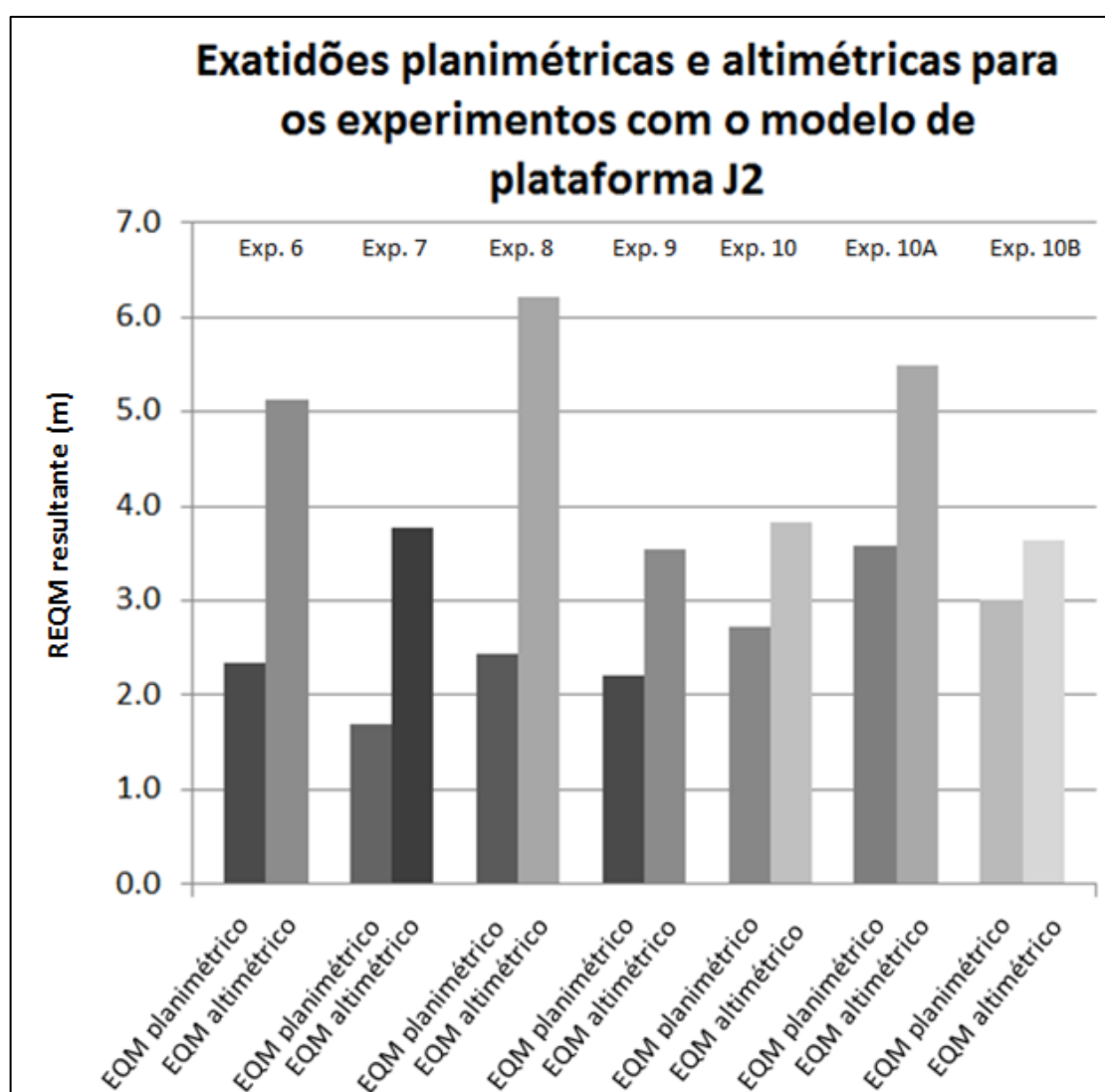


FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES NOS EXPERIMENTOS 10A, 10B E 10.

FONTE: O AUTOR (2015).

Conforme pode ser verificado, as considerações das estimativas dos POI em órbita nas fototriangulações proporcionaram praticamente as mesmas melhorias significativas nas componentes altimétricas de quando se utilizou o modelo de plataforma UCL. Também de forma similar, as melhorias nas exatidões planimétricas resultantes foram da ordem do decímetro.

Similarmente ao ocorrido no experimento 5 com o uso do modelo de plataforma UCL, os resultados do uso dos POI estimados com o tripleto 1, para a realização da orientação interior, utilizando o modelo de plataforma J2 apresentaram-se planimetricamente menos exatos do que os resultados da fototriangulação das imagens do tripleto 3 com estimativa dos POI em órbita. Consequentemente, indica-se também aqui a fototriangulação das imagens com a estimativa dos POI em órbita.

4.3. SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Diante dos resultados obtidos nos experimentos com os três tripletos, pode-se realizar uma síntese dos mesmos. Primeiramente, com relação aos modelos de plataforma, as considerações das acelerações propostas pela atração gravitacional terrestre, devido seu achatamento polar, não apresentou melhorias nos resultados finais em relação ao uso do modelo UCL. Isto pode ter ocorrido devido a dois motivos. O primeiro relacionado ao tempo de formação de cada uma das imagens PRISM de aproximadamente seis segundos. Neste curto intervalo de tempo, a contribuição da perturbação orbital considerada pode-se apresentar no máximo na ordem de grandeza do centímetro, não sendo, portanto, considerada significativa. O segundo motivo pode estar relacionado às baixas qualidades das componentes dos vetores de estado fornecidos pelo GPS à bordo do satélite ALOS, haja vista que os parâmetros estimados X_T , Y_T , Z_T , u_{xT} , u_{yT} e u_{zT} foram da ordem de dezenas de metros.

Com relação às exatidões obtidas nos experimentos, nas fototriangulações com estimativa dos POI em órbita verificaram-se melhorias, em relação às fototriangulações sem estimativa dos POI, principalmente na componente

altimétrica. Estas melhorias foram de aproximadamente 1,4 m no tripleto 1; 2,7 m no tripleto 2 e; 1,8 m no tripleto 3. Na componente X_L , também houve melhorias, porém, menos significativas, de aproximadamente 24 cm no tripleto 1, de 28 cm no tripleto 2 e de 91 cm no tripleto 3. Por outro lado, na componente Y_L , enquanto foram verificadas melhorias de exatidão de 65 cm no tripleto 1 e 11 cm no tripleto 2, no tripleto 3 foi verificada um decréscimo de exatidão de 15 cm. Porém, considerando as exatidões planimétricas resultantes, as estimativas dos POI em órbita propiciaram melhoras em todos os tripletos. Na Figura 42 são apresentadas em forma gráfica as melhorias planimétricas e altimétricas resultantes, para os três tripletos, proporcionadas pelas fototriangulações com estimativa dos POI em órbita.

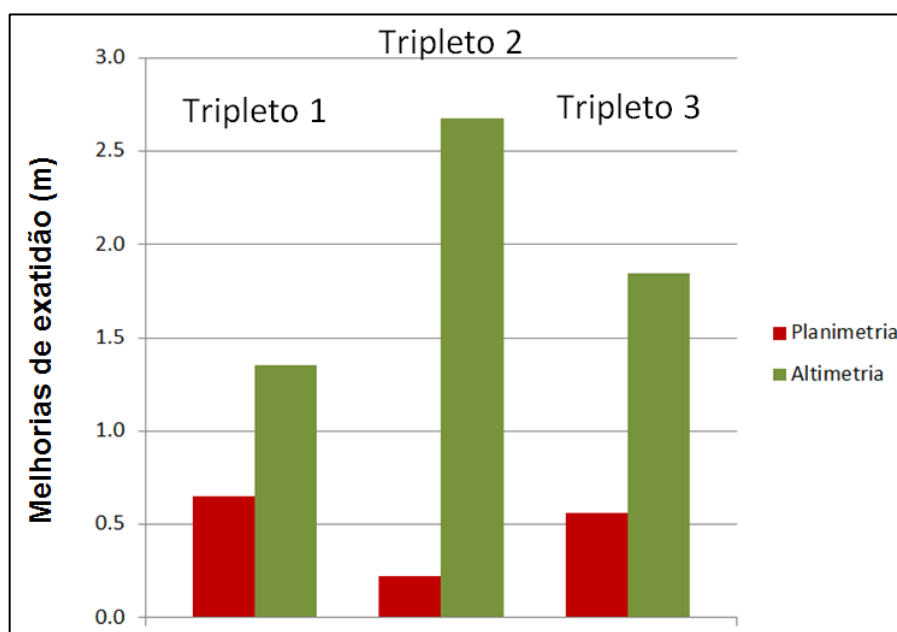


FIGURA 42 – MELHORAS NAS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS RESULTANTES PROPOSTAS PELAS FOTOTRIANGULAÇÕES COM ESTIMATIVA DOS POI
FONTE: O AUTOR (2015).

Como visto, a estimativa dos POI em órbita propôs melhorias na extração de coordenadas tridimensionais do espaço objeto a partir das coordenadas do espaço imagem. No entanto, é importante destacar que as medidas no espaço imagem dos pontos de controle e verificação utilizados nas fototriangulações foram refinadas com o uso da metodologia dos centroides, apresentando qualidade melhor que 1 pixel. Cabe citar também que as magnitudes dos resultados de exatidões planimétricas encontradas nesta pesquisa são concordantes com as magnitudes das exatidões

planimétricas encontradas em Weser *et al.*, (2008b) e Kocaman (2007). Por outro lado, as magnitudes dos valores de REQM altimétricos encontrados nesta pesquisa foram maiores (menos exatos) do que as encontradas nas pesquisas citadas. Isto pode estar relacionado ao conjunto diferente de POI utilizados, ao uso dos modelos de plataforma UCL e J2, ou ainda ao fato de que os pontos de controle e verificação utilizados nas pesquisas citadas foram obtidos a partir de levantamentos geodésicos com receptores GPS, e em maiores quantidades.

Em todos os experimentos de fototriangulação com estimativa dos POI em órbita foram realizadas análises de significância dos POI com o objetivo de identificar um conjunto ótimo para ser estimado. Já nesta etapa, com exceção do POI $a_{1_matriz5}$ da câmera ré do tripleto 2, todos os POI a_1 e b_1 que representam as rotações das matrizes de CCD, juntamente com as alterações das dimensões dos pixels na direção de y_s , se mostraram não significantes. Os POI K_1 e K_2 também se mostraram não significantes em todas as câmeras. Tal resultado indica que os efeitos das distorções radiais simétricas dos sistemas de lentes, das rotações das matrizes de CCD nos planos focais e das alterações das dimensões dos pixels na direção de y_s puderam ser desconsiderados. Com relação aos parâmetros de flexão das matrizes de CCD não houve um padrão. No tripleto 1 apenas o POI $\delta_{matriz2}$ da câmera nadir foi considerado significativo. Para o tripleto 2, os POI $\delta_{matriz3}$, $\delta_{matriz4}$ e $\delta_{matriz5}$ na câmera ré, e o POI $\delta_{matriz6}$ na câmera nadir também foram encontrados significantes. Cabe ressaltar que alguns POI a_0 e b_0 referentes às alterações sistemáticas do posicionamento das matrizes de CCD no plano focal se mostraram não significantes. Desta forma, os mesmos foram retirados dos conjuntos finais de POI sem prejuízo nem para o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ nem para as exatidões planialtimétricas.

Outra etapa realizada nos experimentos de fototriangulação com estimativa dos POI em órbita foram as análises de correlação entre os POI. Tal análise teve o objetivo de investigar se o efeito de algum POI poderia ser em parte modelado por outro POI. Ao analisar os resultados para os tripletos 1 e 2, observou-se que os POI δ significantes citados no parágrafo anterior apresentaram fortes correlações ($\rho \geq 0,75$) com os POI a_0 . Assim sendo, todos os POI δ significantes foram desconsiderados dos conjuntos finais de POI. Observou-se ainda que os POI a_0 significantes apresentaram-se fortemente correlacionados entre eles nas três

câmeras para os dois experimentos. Por outro lado, as fortes correlações entre os POI b_0 significantes não apresentaram um padrão de ocorrência. Mesmo com estes casos de fortes correlações dos POI a_0 e b_0 significantes verificados, a desconsideração dos mesmos provocou uma diminuição das exatidões das fototriangulações. Assim sendo, em resumo, após as análises de significância e de correlações entre os POI, apenas certos parâmetros referentes aos deslocamentos sistemáticos das matrizes de CCD nos planos focais foram considerados nos modelos matemáticos funcionais nos experimentos 2, 4, 7 e 9. Cabe ressaltar que os POI que apresentaram pelo menos um caso de forte correlação com outro POI podem ter perdido o significado físico.

Com o objetivo de investigar a usabilidade dos POI estimados nas fototriangulações das imagens do tripleto 1, nos experimentos 2 e 7, na orientação de outras imagens que não participaram destes experimentos, realizou-se uma análise sobre os coeficientes de correlação entre os POI e os POE e uma análise prática. Na análise das correlações entre os POI e os POE estimados, em ambos os experimentos, apenas na câmera ré houve dois casos de fortes correlações, sendo dos POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ com o POE κ_0 . Tal resultado indica que os valores estimados destes dois POI citados podem ter sido influenciados pelo ângulo κ_0 . Cabe ressaltar que o ângulo κ_0 é um ângulo sem sentido físico, diferentemente do ângulo Ψ utilizado nos modelos do tipo Órbita-Atitude. Em outras palavras, o ângulo κ_0 não representa fisicamente o ângulo de guinada (Ψ) do satélite. Assim sendo, torna-se complexa a análise da situação física que provocou as fortes correlações mencionadas. Por outro lado, nas câmeras nadir e vante não houve nenhum caso de ocorrência de forte correlação entre POI e POE.

Na análise prática de usabilidade dos POI estimados com o tripleto 1, nos experimentos 2 e 7, os mesmos foram utilizados para a orientação interior, nas fototriangulações das imagens do tripleto 3 (experimentos 5 e 10). Verificou-se que houve uma diminuição das exatidões planimétricas, o que pode estar relacionado às fortes correlações verificadas dos POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ com o POE κ_0 na câmera ré nos experimentos 2 e 7. Na componente altimétrica os resultados foram praticamente iguais.

Conforme citado anteriormente, as imagens ré e nadir do tripleto 1 foram formadas pelas matrizes de CCD de 1 a 4. No tripleto 2, as mesmas imagens foram

formadas pelas matrizes de CCD de 3 a 6. No caso das imagens vante, tem-se as matrizes de 3 a 6 no triplete 1 e as matrizes de 5 a 8 no triplete 2. Considerando então o conjunto final de POI em cada triplete após as análises de significância e de correlação, os POI em comum estimados com o uso dos tripletos 1 e 2 para todas as três câmeras são apresentados na Tabela 72.

TABELA 72 – POI EM COMUM ESTIMADOS COM O USO DOS TRIPLETOS 1 E 2 PARA TODAS AS TRÊS CÂMERAS E SEUS VALORES.

Triplete 1	Triplete 2	Diferença de valor
Câmera ré	Câmera ré	Câmera ré
$b_{0_matriz3} = -0,0120 \text{ mm}$	$b_{0_matriz3} = -0,0135 \text{ mm}$	0,0015 mm
$\Delta f = 2,1501 \text{ mm}$	$\Delta f = 1,8179 \text{ mm}$	0,3322 mm
Câmera nadir	Câmera nadir	Câmera nadir
$b_{0_matriz3} = 0,0247 \text{ mm}$	$b_{0_matriz3} = -0,0353 \text{ mm}$	0,0600 mm
$\Delta f = 2,4863 \text{ mm}$	$\Delta f = 1,7720 \text{ mm}$	0,7143 mm
Câmera vante	Câmera vante	Câmera vante
$b_{0_matriz5} = 0,0327 \text{ mm}$	$b_{0_matriz5} = 0,0211 \text{ mm}$	0,0116 mm
$\Delta f = 1,7388 \text{ mm}$	$\Delta f = 2,1869 \text{ mm}$	-0,4481 mm

FONTE: O AUTOR (2015).

Ao analisar na Tabela 73 os valores estimados dos POI em comum com o uso dos tripletos 1 e 2, verifica-se que com exceção do valor do POI $b_{0_matriz3}$ nas câmeras ré, todos os outros POI apresentaram-se com diferenças significativas. Tais diferenças nos POI $b_{0_matriz3}$ na câmera nadir e $b_{0_matriz5}$ na câmera vante podem ser explicadas pela ausência de significado físico nos mesmos, tendo em vista que, conforme citado, pelo menos um dos POI apresentou um caso de forte correlação com outro POI. Com relação à diferença de valores nos POI Δf , a razão pode estar relacionada à alta frequência de ocorrências de correlações moderadas ($0,50 < \rho < 0,75$) (VIEIRA, 2008) com alguns POE e alguns POI, conforme pode ser visto nas Tabelas 24, 25 e 46.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa investigou a exatidão planialtimétrica da fototriangulação com estimativa dos POI em órbita do sensor PRISM – ALOS. O modelo rigoroso de colinearidade com pontos foi utilizado e testado em conjunto com dois modelos de plataforma diferentes. O primeiro foi o modelo de plataforma UCL desenvolvido por Michalis (2005), e o segundo o modelo UCL adicionado da perturbação orbital causada pela atração gravitacional terrestre devido ao seu achatamento polar (modelo de plataforma J2). Ambos os modelos de plataforma foram adaptados ao uso de coordenadas referenciadas ao SRT SIRGAS 2000 a partir da consideração de um termo adicional em função do módulo da velocidade angular de rotação terrestre. Este procedimento objetivou evitar que os pontos de controle, de verificação e fotogramétricos aproximados tivessem que ser transformados para coordenadas referenciadas a um SRCG, o que representaria mais uma etapa em todo o processo.

Em relação aos experimentos dois conjuntos foram propostos, um utilizando somente o modelo de plataforma UCL adaptado e outro utilizando somente o modelo de plataforma J2. Em cada conjunto foram realizados cinco experimentos. No primeiro e segundo experimentos realizou-se, respectivamente, as fototriangulações de um tripleto (tripleto 1) sem e com a estimativa dos POI em órbita. No terceiro e quarto experimentos as mesmas fototriangulações foram propostas utilizando-se outro tripleto (tripleto 2). No quinto experimento, os POI estimados com o primeiro tripleto foram inseridos na fototriangulação das imagens de um terceiro tripleto (tripleto 3). Os resultados foram comparados com os resultados das fototriangulações sem e com a estimativa dos POI em órbita do terceiro tripleto.

Após a realização dos experimentos, conclui-se que para o caso estudado nesta pesquisa, o uso do modelo de plataforma J2 não proporcionou diferenças significativas nas exatidões planialtimétricas, em relação ao uso do modelo UCL adaptado. Tal resultado pode ter sido causado por duas razões: a não significância do efeito da perturbação orbital devido ao curto tempo de órbita durante o imageamento (~6s), e devido as baixas qualidades dos dados GPS à bordo do

satélite ALOS. Neste último caso os erros provenientes da perturbação orbital são menores do que as incertezas dos dados do GPS embarcado.

Outra conclusão é que a estimativa dos POI em órbita nas fototriangulações proporciona melhorias significativas de exatidão nas componentes altimétricas. Tal resultado foi comprovado nos três tripletos testados. Estas melhorias foram de aproximadamente 1,4 m no primeiro triplete; 2,7 m no segundo triplete e de 1,8 m no terceiro triplete. Com relação às exatidões planimétricas resultantes, a estimativa dos POI em órbita propiciou melhoras nos três tripletos, porém na ordem de grandeza do decímetro. É importante ressaltar que as medidas dos pontos de controle e verificação foram obtidas de forma refinada a partir da metodologia dos centroides. As melhorias citadas indicam uma potencialidade de extração mais acurada de coordenadas tridimensionais do espaço objeto a partir das coordenadas do espaço imagem.

Ao comparar-se os valores de exatidões das fototriangulações com estimativa dos POI obtidos nesta pesquisa com os obtidos a partir das pesquisas realizadas por Weser *et al.*, (2008a) e Kocaman (2007), nota-se que planimetricamente há uma proximidade, o que não ocorreu na componente altimétrica. As exatidões altimétricas obtidas nesta pesquisa foram um pouco menores do que as obtidas nos trabalhos de pesquisa citados. Isto pode ter ocorrido pelo uso de um conjunto diferente de POI, pelo uso dos modelos de plataforma UCL e J2, ou ainda pelo fato dos pontos de controle e verificação utilizados nas pesquisas citadas terem sido obtidos a partir de levantamentos geodésicos, com receptores GPS. Outra possível razão é a maior quantidade de pontos de controle distribuídos sobre as imagens testadas.

Com relação aos conjuntos finais de POI utilizados, foram considerados apenas parte dos parâmetros relacionados aos deslocamentos sistemáticos das matrizes de CCD nos planos focais, e os parâmetros relacionados às alterações das distâncias focais. Os efeitos das rotações das matrizes de CCD nos planos focais, das distorções radiais simétricas das lentes e das alterações das dimensões dos pixels na direção de y_s puderam ser desconsiderados sem prejuízos nos resultados finais. Isto em virtude de, ou se apresentarem não significativos, ou de apresentarem forte correlação com algum outro POI. Nos conjuntos finais de POI observou-se que restaram ainda alguns POI fortemente correlacionados com outro(s). Ao

desconsiderar dos conjuntos tais POI, verificaram-se perdas significativas nas exatidões planialtimétricas das fototriangulações. Deste modo, os mesmos foram mantidos nos conjuntos finais de POI, porém, com possível perda de seus significados físicos.

Na investigação de possível uso dos POI estimados na fototriangulação do primeiro tripleto foram analisados primeiramente os coeficientes de correlação entre os POI e os POE. Nesta análise, foi verificado que na câmera ré os POI $a_{0_matriz1}$ e $a_{0_matriz4}$ apresentaram forte correlação com o POE κ_0 . Assim sendo, os valores destes POI podem ter sofrido influência do ângulo κ_0 em suas estimativas. Posteriormente, na análise prática, os POI estimados com o primeiro tripleto foram utilizados para a orientação interior nas fototriangulações das imagens do terceiro tripleto. Como resultado, verificou-se uma piora na componente planimétrica e uma ligeira melhora na componente altimétrica em relação à fototriangulação do terceiro tripleto com a estimativa dos POI em órbita. Tal resultado pode ter sido causado pelas fortes correlações citadas.

Em virtude do seu GSD de 2,5 m, da área de abrangência de imageamento e de sua capacidade de prover imagens aptas à geração de MDT, as imagens PRISM apresentam grande potencialidade de uso para construção de mapeamentos topográficos. Este tipo de mapeamento é necessário, por exemplo, para planejamentos socioeconômicos e anteprojetos de engenharia. Porém, para que o completo potencial geométrico destas imagens possa ser explorado, a orientação com estimativa dos POI em órbita é indicada. Nesta pesquisa, comprovou-se que as melhorias podem alcançar até mais de 2 m na componente altimétrica, e até 0,5 m na componente planimétrica resultante, o que seria de grande importância para a geração de MDT e posteriormente de ortofotos e vetores restituídos.

Como pesquisas futuras a serem desenvolvidas, recomenda-se ainda a verificação da fototriangulação com estimativa dos POI em órbita do sensor PRISM com a metodologia de polinômios apresentada em Weser *et al.*, (2008a), juntamente com o modelo de plataforma UCL; a aplicação da metodologia empregada nesta pesquisa em outros sensores orbitais como o embarcado no satélite chinês ZY III e; a realização da estimativa dos POI em órbita do sensor PRISM, bem como de outros sensores orbitais, utilizando o modelo rigoroso de colinearidade com pontos do tipo Órbita-Atitude e modelos rigorosos de coplanaridade com retas. Recomenda-se

ainda o uso de coordenadas de pontos de controle e verificação extraídos de levantamentos geodésicos com receptores GNSS.

6 REFERÊNCIAS

- AL-ROUSAN, N.; CHENG P., PETRIE, G.; TOUTIN, T.; VALADAN ZOEJ, M. J. Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1B Imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 8, p. 965-974, 1997.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba. SBEE, 258 p. 2003.
- BAIOCCHI V.; CRESPI M.; DE VENDICTIS L.; GIANNONE F. A new rigorous model for the orthorectification of synchronous and asynchronous high resolution imagery. In: 24th EARSeL Symposium, 2004, Dubrovnik. **Anais...** Dubrovnik, 2004. p. 461-468, 2004.
- BALTSAVIAS, E., ZHANG, L., EISENBEISS, H. DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a Testfield in Switzerland. **Photogramm. Fernerkund. Geoinf.**, v. 1, p. 41 – 54, 2006.
- BANG, K. I.; CHO, W. Analysis of EOC Sensor Model. In: FIG WORKING WEEK, 2001, Seoul, Korea. **New Technology for a New Century**, Seoul, p. 57-65, 2001.
- BATE, R.; MUELLER, D.; WHITE, J. **Fundamentals of Astrodynamics**, Dover, 1971.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, pp. 855-866, 1971.
- BROWN, D. C. The bundle adjustment – progress and prospects. **International Archives of Photogrammetry**, v. 21, n. 3-03-041, 1976.
- CAMARGO, P. O. Ajustamento de Observações. Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista, 2000. 227 f. Apostila.
- CHEN, L.C.; TEO, T.A. Rigorous Generation of Orthophotos from EROS-A High Resolution Satellite Images. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. B4, 2002.
- CLARKE, T. A., FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 51-66, 1998.
- COSTA, E. R. **Geração automática de Modelos Digitais de Terreno a partir de imagens de câmaras digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – FCT, Universidade Estadual de São Paulo, Presidente Prudente. 2006.
- CRCSI. Barista User Manual. Disponível em:< <http://www.baristasoftware.com.au/>>. Acesso em: 18 dez. 2012.

DALAZOANA, R.; FREITAS, S. R. C. Efeitos na Cartografia devido a evolução do sistema geodésico brasileiro e adoção de um referencial geocêntrico. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 54, 2002.

DOWMAN, I. J.; MICHALIS, P. Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. In: ISPRS, 2003, Hannover. **Workshop High Resolution Mapping from Space**, Hannover: ISPRS, 2003

DOWMAN, I.; MICHALIS, P.; LI, Z. **Analysis of Urban Landscape Using Multi Sensor Data**. Disponível em:< http://repository.tksc.jaxa.jp/help/pdf/SP-11-007E/pdf/PI061_Ian_Dowman.pdf> Acesso em: 20 de dezembro de 2011.

EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. New York: Taylor & Francis, 351 p. 2002.

ESCOBAL, P.R. **Methods of orbit determination**, Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 479 p. 1965.

FRASER, C.S.; ROTTENSTEINER, F.; WESER, T.; WILLNEFF, J. A New Generic Sensor Orientation Model Applied to ALOS Imagery. In: Asian Conference on Remote Sensing, 2007, Kuala Lumpur. **Anais...** Kuala Lumpur, 2007.

FRITSCH, D.; STALLMANN, D. Rigorous photogrammetric modelling processing of high-resolution satellite imagery. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 33. Amsterdam, 2000.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J.K.; CAMARGO, P. O. Significância dos parâmetros de orientação interior na calibração de câmaras. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 2008, Recife. **Anais...** Recife, 2008.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 319 p. 1994.

GEMAEL, C; ANDRADE, J.B.; **Geodésia Celeste**. Curitiba: Ed. UFPR, 389 p. 2004.

GIANONE, F. **A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation**. PhD thesis (PhD em Engenharia civil), Department of “Idraulica e Trasporti e Strade”, “Geodesia e Geomatica” Area, University of Rome, Roma, 2006.

GRUEN, A.; KOCAMAN, S.; WOLFF, K. Calibration and validation of early ALOS/PRISM images. **The Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing**, v 46, n. 1, pp. 24-38, 2007.

GUGAN, D. J.; DOWMAN, I. J. Topographic mapping from SPOT imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 1409–1414, 1988.

HEIPKE, C. Overview of image matching techniques. In: Workshop on the application of digital photogrammetric workstations, 1996, Lausanne. **Anais...** Lausanne, 1996.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Diretoria de Geociências – Coordenação de Geodésia. Manual do Usuário Posicionamento Por Ponto Preciso Versão: março 2009. Disponível em: < http://www.ppp.ibge.gov.br/manual_ppp.pdf > Acesso em: 07 de junho de 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Diretoria de Geociências - DGC. Noções Básicas de Cartografia. Rio de Janeiro, IBGE, 1998.

JACOBSEN, K. Calibration of IRS-1C PAN-camera, In: Joint Workshop “Sensors and Mapping from Space”, 1997, Hannover. **Anais...** Hannover, 1997.

JACOBSEN, K. Issues and methods for in-flight and on-orbit calibration. In: Morain, S., Budge, A. (Eds.), Post-launch calibration of satellite sensors, ISPRS Book Series, Vol.2, p. 83 - 92, 2004.

JACOBSEN, K. Geometry of satellite images – calibration and mathematical models. In: Korean Society of Remote Sensing - ISPRS international conference, 2005, Jeju, **Anais...** Jeju, 2005. p. 182-185, 2005.

JACOBSEN, K. Orientation of high resolution optical space images. In: ASPRS 2007 Annual Conference, 2007, Tampa. **Anais...** Tampa, 2007.

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency. ALOS User Handbook. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf>, Acesso em: 15 de fevereiro de 2012.

JOVANOVIC, V. M., SMYTH, M. M., ZONG, J. **MISR Level 1 In-flight Geometric Calibration Algorithm Theoretical Basis**. JPL report, code JPL D-13399, Rev. B, 1999.

KAMIYA, I.; SAITO, G. Reduction of JPEG and Other Noise for ALOS PRISM Image. In: Asian Conference on Remote Sensing, 2007, Kuala Lumpur. **Anais...** Kuala Lumpur, 2007.

KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. 114, p. 110–123, 2006.

KOCAMAN S. **Sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery**. PhD thesis (PhD em Engenharia Geomática), Institut f. Geodäsie u. Photogrammetrie, ETH Zürich, Zurique, 2007.

KOCAMAN, S., GRUEN, A. Calibration and validation of early alos/prism images. **Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing**, pp. 24 – 38, 2007a.

KOCAMAN, S.; GRUEN, A. Orientation and Calibration of ALOS/PRISM Imagery. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, Part I/W51. Hannover, 2007b.

KOCAMAN, S.; GRUEN, A. Geometric modeling and validation of ALOS/PRISM imagery and products. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, Part B1. Beijing, 2008.

KORNUS, K., LEHNER, M., SCHROEDER, M. Geometric Inflight Calibration of the Stereoscopic CCD-Linescanner MOMS-2P, In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 32-1, p. 148 - 155, 1998.

KRATKY, V. Rigorous photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 53-71, n. 44, 1989.

LEICK, A. **GPS Surveying**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 435 p. 2004.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 318 p. 2005.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba, 134p. 1987.

MACHADO E SILVA, A. J. F. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos**. Tese (Doutorado em Engenharia Espacial) - INPE, São José dos Campos. 2007.

MACHADO, M. V.; RODRIGUES, T. L. DEBIASI, P. Orientação de imagens HRC pelo Modelo de Kepler com parâmetros adicionais da geometria interna do sensor. In: VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2013, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2013.

MARCATO, J. J. **Fototriangulação em bloco de imagens orbitais com modelos rigorosos baseados em pontos e retas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – FCT, Universidade Estadual de São Paulo, Presidente Prudente. 2011.

MCCARTY, D. D.; PETIT, G. IERS Conventions (2003), IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt am Main. 2004. 127 p.

MICHALIS, P. **Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors**. PhD thesis (PhD em Geomática), Department of Geomatic Engineering, University College London, London, 2005.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. A rigorous model and DEM generation for SPOT5-HRS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, Parte B1, Comissão I, p. 410 - 415, 2004

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. A model for along track stereo sensors using rigorous orbit mechanics. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 1/W1, 2005.

MICHALIS P.; DOWMAN I. J. An improved model for along-track stereo sensors using rigorous orbit mechanics and navigation data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, Parte A, Comissão I, 2006.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. A Generic Model for Along Track Stereo Sensors Using Rigorous Orbit Mechanics. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n. 3, p. 303 - 309, 2008a.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. Exterior orientation improved by the coplanarity equation and DEM generation for Cartosat-1. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, Parte B1, Comissão I, p. 1301-1308, 2008b.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. Noise-Reduction and exterior orientation improvement by the coplanarity equation for ALOS-PRISM. In: ALOS PI Symposium, 2010, Tokio. **Anais...** Tokio, 2010.

MONTENBRUCK, O.; GILL, E. **Satellite Orbits: Models, Methods and Applications**. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamento e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.476p.

MULAWA, D. On-Orbit geometric calibration of the Orbview-3 high resolution imaging satellite. In: XX ISPRS Congress on Geo-Imagery Bridging Continents, 2004, Istanbul. **Anais...** Istanbul, 2004.

ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 12, p. 1431-1437, 1994.

POLI, D. **Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors**. PhD thesis (PhD em Ciências Técnicas), Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology - ETH, Zurich, 2005.

POLIDORI, L. DSM quality: internal and external validation. In: EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 351 p. 2002.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R. Orbit attitude modelling of spot imagery with a single ground control point. **The Photogrammetric Record**, v. 14, n. 84, p. 973, 1994.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R.; MURALIMOHAN, A. S. R. K. V. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 5, p. 262–271, 1998.

RADHADEVI, P. V., SOLANKI, S. S. In-Flight geometric calibration of different cameras of IRS P6 using a physical sensor model. **The Photogrammetric Record**, v. 23, n.121, p. 69 - 89, 2008.

RODRIGUES, T. L. **Análise da aplicação do movimento kepleriano na orientação de imagens HRC-CBERS 2B**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

RODRIGUES, T. L.; FERREIRA, L. D. D. Aplicação do movimento kepleriano na orientação de imagens HRC – CBERS 2B. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 1, p. 114 - 134, 2013.

RODRIGUES, T. L.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D. Adaptação do Modelo de Kepler e inserção do harmônico zonal J2 do geopotencial na orientação de imagens orbitais. In: VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2013, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2013.

RODRIGUES, T. L.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D. Orientação de imagens PRISM – ALOS utilizando diferentes modelos de plataforma. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 409 - 432, 2015a.

RODRIGUES, T. L.; MACHADO, M. V.; DEBIASI, P.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D. (no prelo) Calibração geométrica em órbita do sensor HRC-CBERS 2B. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2015b.

ROTTENSTEINER, F., WESER, T., LEWIS, A. AND FRASER, C.S. A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS imagery. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, Cape Town, **Anais...** Cape Town, 2009. p. 4083 – 4091, 2009.

SALAMONOWICZ, P. H. Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 52, n. 4, p. 491–499, 1986.

SATORU, W.; AKIHIRO, H. Development of the Earth Observation Satellite “DAICHI” (ALOS). **NEC Technical Journal**. v. 6, n. 1, p. 62-66, 2011.

SCHNEIDER, M.; LEHNER, M.; MÜLLER, R.; REINARTZ, P. Stereo Evaluation of ALOS/PRISM Data on ESA-AO Test Sites – First DLR Results. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37. Parte B1. Beijing, 2008.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlim: Walter de Gruyter, 2003.

SCHENK, T. Automatic Generation of DEM's. In: **Manual of Photogrammetry Addendum**. USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. v. I. Ohio: Terra Science, 428 p. 1999.

TADONO, T.; IWATA, T.; SHIMADA, M.; TAKAKU, J.; KAWAMOTO, S. Updated results of calibration and validation of PRISM onboard ALOS. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, Honolulu. **Anais...** Honolulu, 2010. p. 36-38, 2010.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; HASHIMOTO, T.; TAKAKU, J.; MUKAIDA, A.; KAWAMOTO, S. Results of Calibration and Validation of ALOS Optical Sensors, and Their Accuracy Assessments. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007, Barcelona. **Anais...** Barcelona, 2007. p. 3602 – 3605, 2007b.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; IWATA, T.; TAKAKU, J. Accuracy Assessment of Geolocation Determination for PRISM and AVNIR-2 onboard ALOS, In: Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, 2007, Zurique. **Anais...** Zurique, 2007. p. 214 – 222, 2007a.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; MURAKAMI, H.; TAKAKU, J. Calibration of PRISM and AVNIR-2 onboard ALOS "Daichi". In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, Cape Town. **Anais...** Cape Town, 2009. p. 4042-4050, 2009.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; TAKAKU, J.; KAWAMOTO, S. Updated results of calibration and validation of ALOS optical instruments. In: SPIE 7106, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XII, 2008, Cardiff. **Anais...** Cardiff, 2008. 71060J, 2008.

TADONO T.; SHIMADA M.; WATANABE M.; HASHIMOTO T.; IWATA T. **Calibration and Validation of PRISM Onboard ALOS**. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v.35, part B1, Istanbul, 2004.

TADONO, T.; SHIMADA, M.; WATANABE, M.; MUKAIDA, A.; KAWAMOTO, S.; IMOTO, N.; YAMASHITA, J. Initial Results of Calibration and Validation for ALOS Optical Sensors. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006, Denver. **Anais...** Denver, 2006. p. 1643 – 1646, 2006.

TAKAKU J.; TADONO T. PRISM geometric validation and DSM generation status. In: The First Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto, 2007, Kyoto. **Anais...** Kyoto, 2007.

TAKAKU, J.; TADONO, T. High resolution DSM generation from ALOS PRISM - Status updates on over three year operations -. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, Cape Town. **Anais...** Cape Town, 2009. p. III-769 - III-772, 2009.

TAKAKU, J.; TADONO, T. High resolution DSM generation from ALOS PRISM - Archiving and mosaicing -. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011, Vancouver. **Anais...** Vancouver, 2011. p. 4336 – 4339, 2011.

TAKAKU J.; TADONO T.; SHIMADA, M. High Resolution DSM Generation from ALOS PRISM - Calibration Updates -. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008, Boston. **Anais...** Boston, 2008. p. I-181 - I-184, 2008.

TOLEDO, A. C. L.; PEREIRA, A. A. C.; ALBERTI, G. A.; CORREIA L. S.; MARCATO, V. J. **Fototriangulação em bloco de imagens ALOS/PRISM para mapeamento na escala 1:25000 da região de Presidente Prudente – SP**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Cartográfica), – FCT, Universidade Estadual de São Paulo, Presidente Prudente. 2010.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 254 p. 2001.

TOUTIN, T. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.10, p. 1893 - 1924, 2004.

TOUTIN, T., BLONDEL, E., MIETKE, S., ROTHER, K. In-flight calibration of SPOT-5 and Formosat-2. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.36, Part B1, Commission I, p. 360 - 367, 2006.

VALADAN, M. J. Z. **Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping**. PhD thesis, volume I (PhD em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto), University of Glasgow, Glasgow, 1997.

VALADAN, M. J. Z.; PETRIE, G. Mathematical Modeling and Accuracy Testing of SPOT Level 1B Stereo-Pairs, **Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 67-82, 1998.

VALADAN ZOEJ, M. J.; SADEGHIAN, S. Orbital Parameter Modeling and Accuracy Testing of IKONOS Geo Image, **Photogrammetric Journal of Finland**, v. 18, n. 2, p. 70-80, 2003.

VIEIRA, S. **Introdução à Bioestatística**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 360 p. 2008.

WANG, M.; YANG, B.; HU, F.; ZANG, X. On-Orbit geometric calibration model and its applications for high-resolution optical satellite imagery. **Remote Sensing**, v. 6, p. 4391 – 4408, 2014.

WESER, T.; ROTTENSTEINER, F.; WILLNEFF, J.; POON, J.; FRASER, C. S. Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. **The Photogrammetric Record**, v.23, n. 123, p. 255 – 274, 2008a.

WESER, T.; ROTTENSTEINER, F.; WILLNEFF, J.; FRASER, C. S. **An improved pushbroom scanner model for precise georeferencing of ALOS PRISM imagery**. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 37, Part B1-2. Beijing, 2008b.

WESER, T., ROTTENSTEINER, F., WILLNEFF, J. AND FRASER, C.S. **A generic pushbroom sensor model for high-resolution satellite Imagery applied to SPOT 5, QUICKBIRD and ALOS data sets**. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, Part I/W51. Hannover, 2007.

WESTIN, T. Precision rectification of SPOT imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 2, p. 247-253, 1990.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS**. 3. ed. U.S.A: McGraw-Hill Book Company, 2000.

ZHANG, Y., ZHENG. M. Bundle Block Adjustment with self-calibration of long orbit CBERS-02B imagery. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, Part B1, p. 291 - 296, 2012.